

NOTE TECHNIQUE DE SYNTHÈSE

ANALYSE DE CAS DE DISSOLUTION NATURELLE DES ROCHES : LES PROCESSUS DE DISSOLUTION EN COURS AU SEIN DES FONDATIONS DU BARRAGE DE MOSSOUL (IRAQ) ET LEURS CONSÉQUENCES EN TERMES DE STABILITÉ DE L'OUVRAGE.

***Préambule** : Cette note s'inscrit dans le cadre des réflexions en cours à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS sur les risques liés à la dissolution d'origine naturelle ou anthropique des roches présentant une certaine solubilité dans l'eau. Des travaux de recherche et expertise en cours sur ce sujet s'appuient entre autres sur l'analyse en retour d'expérience des accidents et incidents survenus en France et à l'étranger. C'est dans ce contexte que se place la présente note.*

Elle est établie à partir d'un ensemble de documents bibliographiques et de publications scientifiques disponibles dans la littérature scientifique. Un certain nombre d'articles de presse ont également été utilisés. L'INERIS n'a toutefois réalisé aucune investigation in-situ ou inspection de ce site particulier. Les interprétations formulées, sont basées sur des données issues de la bibliographie en s'appuyant sur les connaissances propres de l'INERIS de la problématique de dissolution des roches.

1. POSITIONNEMENT DE CETTE NOTE PAR RAPPORT AUX TRAVAUX DE L'INERIS

L'impact sur la sécurité publique et l'environnement des cavités de dissolution d'origine naturelle a conduit l'INERIS à réaliser des travaux de recherche et d'expertise sur les mécanismes de dissolution des roches et les risques associés. Les travaux de recherche (expérimentation in situ, en laboratoire, ainsi que la modélisation) s'inscrivent dans le cadre de l'axe de recherche CORDIS de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol (DRS). Une partie de ces recherches sont menées en partenariat avec le Centre géoscience Mines Paris-Tech et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse afin d'améliorer la connaissance sur les mécanismes de dissolution et de développer des outils de modélisation permettant de quantifier l'évolution spatio-temporelle de systèmes de dissolution dans des environnements variés.

Les enjeux qui sous-tendent ces recherches résident dans une meilleure prédiction des mouvements de terrain (et leurs impacts) induits par la dissolution de telles évaporites. Ces travaux prennent en compte les résultats des expériences de laboratoire et *in situ* sur la dissolution des roches telles que le gypse et le sel. Les risques liés à la formation progressive des vides créés par dissolution dans ce type de formations sont évalués. En particulier, les mécanismes de formation de fontis et leurs impacts en surface du sol et sur des ouvrages hydrauliques. Ce travail est mis à profit dans le cadre du programme EAT-DRS 02 sur les risques naturels de mouvement de terrain, en appui technique au Ministère de l'Ecologie, de l'Energie et du Développement Durable.

En effet, la problématique des risques naturels liés à la dissolution des roches concerne plusieurs régions françaises et notamment la région Île-de-France. Dans ces secteurs, l'INERIS appuie les pouvoirs publics, les collectivités, et les industriels dans la prise en compte de cet aléa en termes d'aménagement du territoire. Ce travail se concrétise en particulier par le développement des méthodologies d'évaluation adaptées aux mécanismes mis en jeu.

Le cas d'étude présenté dans la suite est un exemple intéressant pour les travaux de recherche et d'expertise de l'INERIS en termes de perspectives, d'enjeux et de compréhension des mécanismes de dissolution et de leur traitement pour la sécurité des populations et des biens.

2. CONTEXTE GÉNÉRAL ET DESCRIPTION DU BARRAGE DE MOSSOUL

Le barrage de Mossoul (aussi appelé barrage d'Eski ou barrage Saddam) se situe au nord du territoire iraquien (Figure 1). Il est construit sur le Tigre (*Riv.*) dont la majorité du bassin versant draine le territoire turc. L'ouvrage se localise à 50 km en amont de Mossoul et à 80 km des frontières syriennes et turques.

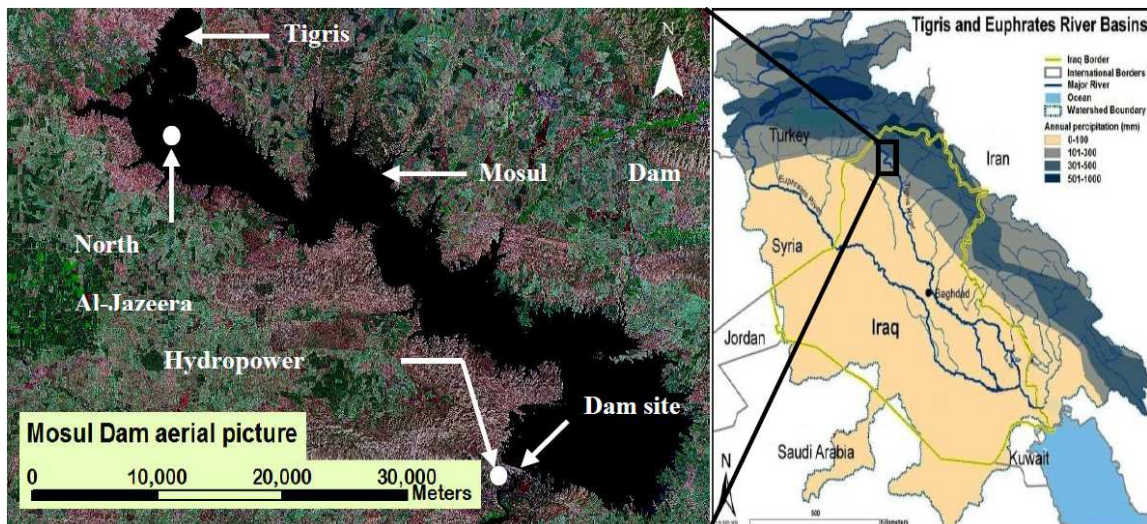


Figure 1 : Localisation du barrage de Mossoul (Sissakian et al., 2015)

La construction de l'ouvrage (réalisé par le consortium germano-italien *GIMOD*) a débuté en 1980 et sa mise en eau au printemps 1985. Sa capacité était initialement de 11,1 milliards de mètres cubes à sa cote maximale de 330 m. Elle s'est réduite depuis de 14.7 % du fait des processus de sédimentation. Il s'agit d'un barrage poids orienté selon une direction globalement est-ouest, d'une hauteur de 113 m et d'une longueur de 3,4 km, sa largeur au sommet est de 10 mètres.

3. PROBLÉMATIQUE

Le choix d'implantation du site du barrage n'est pas intervenu en tenant compte de critères habituels d'ordre géologique et d'ingénierie. L'ouvrage a été localisé de manière à optimiser le potentiel hydroélectrique du barrage (1000 MW) ainsi que ses capacités en termes d'alimentation en eau potable, d'irrigation (la zone couverte s'étend sur 625 km²) ainsi que pour le contrôle des crues et probablement également pour des raisons géopolitiques.

La principale conséquence de cette absence de prise en compte du contexte géologique est que le barrage a été construit dans une zone de karstification intense de terrains gypsifères et carbonatés (formation de vides liés à la dissolution de ces roches). Cette problématique de karstification est connue depuis longtemps dans cette partie nord de l'Iraq et le phénomène s'est accéléré durant le XXème siècle.

Au niveau de la ville de Mossoul, les processus de dissolution se sont intensifiés provoquant de nombreux désordres en surface. Ce phénomène s'explique principalement par l'augmentation des débits d'infiltration anthropiques et notamment d'eaux usées liés à l'augmentation du niveau de vie des populations (consommation d'eau multipliée par 20 entre 1900 et 1940).

L'horizon géologique mis en cause correspond à la formation de Fatha. Il s'agit de terrains formés géologiquement dans un contexte climatique aride et un contexte géographique côtier à la topographie extrêmement peu marquée. Ce contexte correspond aux zones de sebka actuelles que l'on trouve par exemple en Arabie Saoudite. Ces terrains se sont déposés au Miocène supérieur entre 11,2 et 5,3 Ma. Sur le site du barrage, la partie supérieure de la formation est composée de calcaires qui surmontent une alternance de gypse, d'anhydrite, de marnes et de zones bréchiques. Au total quatre niveaux principaux de gypse, d'une épaisseur variant entre 6 et 8 mètres se répartissent sur toute la hauteur de la formation. Du point de vue de la structure des terrains, l'ensemble pend en direction du sud-est avec un pendage moyen de 12°.

4. LE PROCESSUS DE DISSOLUTION DU GYPSE EN COURS AU NIVEAU DU BARRAGE

De nombreux indices de karstification des formations gypseuses en surface et en profondeur ont été mis en évidence lors des travaux de construction du barrage (Figure 2). Des niveaux fortement bréchifiés du fait de leur déstructuration liée à la dissolution ont également été rencontrés. Ces processus de dissolution préexistants à la construction du barrage font de la formation de Fatha une zone très hétérogène d'un point de vue hydraulique et ce dans les trois directions de l'espace. Cette forte hétérogénéité a permis le développement, dès la mise en eau du barrage, de zones d'infiltration et de circulation préférentielles dans le fond de la retenue. Les études menées montrent également que le rideau d'étanchéité réalisé sous le barrage a été contourné par les écoulements dès la mise en eau. Du fait de la structure générale des terrains, l'écoulement des eaux souterraines se fait globalement du nord vers le sud en suivant le pendage des formations et en passant de l'amont à l'aval du barrage, ce qui compromet l'étanchéité de l'ouvrage et menace sa stabilité.

Les travaux réalisés par le corps des ingénieurs de l'armée US, montrent qu'une nouvelle zone de dissolution active s'est créée et s'est déplacée depuis la mise en route du barrage. Initialement la zone de dissolution active se situait entre 60 et 70 mètres de profondeur. Du fait de la présence du barrage et des apports d'eau de la retenue, une nouvelle zone de dissolution s'est développée en sub-surface.

L'augmentation de charge hydraulique a intensifié le régime des écoulements dans la zone de karstification initiale du fait de l'augmentation du gradient hydraulique. En parallèle, l'introduction d'eau sous-saturée vis-à-vis du gypse en provenance de la retenue dans la partie supérieure de la formation de Fatha a créé une nouvelle zone de dissolution très active. La construction du barrage a donc considérablement intensifié les processus de dissolution dans le sous-sol.

Cette augmentation des processus de karstification a donné lieu à la formation de fontis (cavités débouchant progressivement en surface du sol) en aval du barrage, dont certains sont apparus récemment. Des zones de pertes (fontis permettant à un flux d'eau de s'infiltrer dans le sol) ont également pu être observées lors d'investigations sonar du fond de la retenue.



Figure 2 : Indices de dissolution, photos prises durant la construction du barrage (1982-1983) par A.T. Ayoub d'après Kelley et al. en 2007.

Les études les plus récentes montrent que, depuis la mise en eau du barrage le front de dissolution nouvellement créé s'est déplacé en direction du sud est. Plutôt localisé initialement sur l'appui en rive droite du barrage, il menace maintenant l'appui en rive gauche situé au sud-est. Il a été mis en évidence que les débits de fuite en aval augmentent considérablement lorsque la cote du plan d'eau dépasse 318 m. Il est très probable que l'arrivée d'eau à cette cote alimente des réseaux d'écoulement fossiles issus de phases de karstification antérieures qui ont été réactivés par la présence du barrage.

5. PRISE EN COMPTE DE L'ALÉA DISSOLUTION

Le Barrage de Mossoul a donc été confronté dès sa construction à la problématique de dissolution du gypse qui a dû être gérée dès sa mise en service. Cela s'est traduit en premier lieu, lors de sa construction, par la réalisation d'un rideau d'étanchéité sous le barrage jusqu'à 150 m de profondeur.

Lors du remplissage du barrage, l'étanchéité attendue n'était pas au rendez-vous. Un programme massif d'injection de matériaux de comblement a donc été mis en œuvre afin de s'opposer à l'intensification des processus de dissolution en cours pour que ceux-ci n'affectent pas la stabilité géotechnique de l'ouvrage. Au total, 95,6 mille tonnes de matériaux dont la nature a varié au cours du temps (mélange de ciment et de sable initialement, suivi de l'injection de graves et plus récemment un mélange à base de bentonite) ont été injectées. Ces travaux de comblement s'effectuent depuis une galerie située sous les fondations du barrage, initialement alimentée par deux centrales de fabrication du coulis de comblement. D'autres travaux de comblement sont réalisés depuis la surface du sol notamment pour traiter l'appui est de l'ouvrage. Le choix des zones à traiter se fait en fonction de degré de diminution de charge hydraulique des eaux souterraines entre l'amont et l'aval du barrage. Ce paramètre est révélateur du flux d'eau qui s'infiltre sous la retenue et donc de l'augmentation de perméabilité du milieu, conséquence directe des processus de formation du vide en lien avec la dissolution du gypse.

Le retour d'expérience acquis montre que les travaux de comblement ont peu d'effets sur le débit de fuite à travers les fondations du barrage. Lorsqu'une zone est traitée, les écoulements se déplacent et trouvent rapidement d'autres chemins. En revanche, ces travaux permettent de combler les vides souterrains et de limiter l'apparition de désordres sous la structure du barrage.

Pour la période la plus récente, à partir de 2007 notamment, il est difficile d'évaluer la qualité des travaux de comblement effectués ainsi que la pérennité des installations dédiées au traitement des zones de dissolution. Les sources d'information sont contradictoires sur ce point. En effet, certaines décrivent des travaux d'injection jusqu'en 2014 alors que d'autres font mention de l'arrêt du traitement en 2008 et de l'impossibilité d'accéder au barrage pour les scientifiques américains depuis cette date.

6. EVÈNEMENTS RÉCENTS

L'instabilité géopolitique de la région menace actuellement la stabilité du barrage. En effet, si un traitement continu n'est pas mis en place notamment sur l'appui est du barrage, la stabilité de l'ouvrage peut être compromise à très court terme.

La ville de Mossoul est occupée par les troupes de « l'état islamique » depuis juin 2014. En août 2014, ce dernier a pris possession du barrage pendant quelques jours avant que les troupes kurdes (peshmerga iraqiens) n'en reprennent possession, appuyés par des frappes américaines.

Les autorités américaines ont alerté récemment les autorités iraqiennes sur le fait qu'il devenait urgent que le traitement des vides créés par dissolution reprenne. En effet, il en va de la sécurité de millions de personnes vivant en aval. La vague d'une vingtaine de mètres de haut qui déferlerait jusqu'à Bagdad, en cas de rupture de l'ouvrage, pourrait causer jusqu'à 500 000 de morts et faire un million de sans abris.

Le groupe Italien TREVI a négocié avec le gouvernement iraquien pour réaliser des réparations d'urgence pour un montant de 360 M\$. Afin d'encadrer ces travaux, 450 militaires italiens devaient être dépêchés sur place (*Le monde*, 2015). Cependant en janvier 2016, des éléments dissidents au sein du gouvernement iraquien ont affirmé que cette protection militaire étrangère n'était pas souhaitée et que la protection du barrage par les forces iraqiennes était suffisante.

Dans ces conditions, le groupe TREVI n'envisage plus de réaliser les travaux, les conditions de sécurité n'étant pas suffisantes pour le personnel intervenant sur place. Les fondations du barrage ne seront donc pas traitées à court terme alors que débute la période de février à mi-mai où la charge hydraulique sur le barrage ainsi que l'introduction d'eau participant au processus de création de vides sont les plus importantes.

7. BIBLIOGRAPHIE

Le présent document a été rédigé à partir des travaux suivants :

Publications :

- Adamo, Nasrat, Al-Ansari, Nadhir Issa E. Issa; Sissakian, Varoujan; Knutsson, Sven (2015) **Mystery of Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World : Maintenance Grouting**. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 5, No. 3, 05.05.2015, p. 71-77.
- Charmoille, A., Lecomte, A., Daupley, X. (2015) Etude des processus de dissolution affectant le sous-sol du Bois de la Tussion (Seine-saint-Denis) De la compréhension des mécanismes à l'évaluation de l'aléa. Mines & Carrières, octobre 2015, n° 229 HS.

- Daupley, X. laouafa, F., Billotte, J., Quintard, M. (2015) La dissolution du gypse : Quantifier les phénomènes. Mines & Carrières, octobre 2015, n°229 HS.
- Varoujan Sissakian, Nadhir Al-Ansari, Issa E. Issa, Nasrat Adamo, Sven Knutsson, (2015) **Mystery of Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World : General Geology.** Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 5, No. 3, 05.05.2015, p. 71-77
- Sissakian, V. , Al-Ansari, N. and Knutsson, S. (2014) **Karstification Effect on the Stability of Mosul Dam and Its Assessment, North Iraq.** Engineering, 6, 84-92. doi: 10.4236/eng.2014.62012.
- Issa, E.I., Al-Ansari, N., and Knutsson, S., (2013). **Sedimentation and new operational curves for Mosul Dam, Iraq.** Hydrological Sciences Journal, 58 (7), 1456-1466.
- Saad Z. Jassim Antwanet S. Jibril Nazar M. S. Numan (1997) **Gypsum karstification in the Middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq** Geomorphology 02/1997; 18(2):137-149. DOI: 10.1016/S0169-555X(96)00018-9.

Rapports :

- Julie R. Kelley, Lillian D. Wakeley, Seth W. Broadfoot, Monte L. Pearson, Christian J. McGrath, Thomas E. McGill, Jeffrey D. Jorgeson, and Cary A. Talbot (2007) **Geological Setting of Mosul Dam and Its Engineering Implication.** US Army Corps of Engineers, engineer Research and Development Center ERDC TR-07-10.

Articles de Presse :

- Michael R. Gordonjan, (2016) **Neglect May Do What ISIS Didn't : Breach Dam.** January 11, 2016 New York Times.
- Terry Cook (2015), **Iraq's biggest dam on unsure footing.** Thursday, June 4, 2015 on www.earthmagazine.org.
- *Le Monde.fr avec AFP* (2016) **L'Italie envoie des soldats protégés le barrage de Mossoul.** 16.12.2015 à 09h50.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Arnaud CHARMOILLE	Xavier DAUPLEY	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Émissions de Gaz	Responsable de l'unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol	Directeur des Risques du sol et du Sous-sol
Visa	