

## SOLUTIONS D'OBTURATION DE PERTUIS POUR TRAVAUX DE MAINTENANCE A SEC SUR DES INSTALLATIONS SUBAQUATIQUES

### *Obturation solutions of sluices for dry refurbishment works on underwater facilities*

Michel LEON

SDEM – Groupe HYDROKARST, 9 bis avenue de la Falaise 38360 Sassenage (France)

[m.leon@sdem-hydro.fr](mailto:m.leon@sdem-hydro.fr)

## MOTS CLEFS

Travaux subaquatiques hyperbares, scaphandriers, prise d'eau, vidange de fond, montage, manutention, moyens nautiques, conception, calculs, ancrages, obturation, sédiments, réhabilitation.

## KEY WORDS

Hyperbaric underwater works, divers, water intake, bottom outlet, erection, lifting and handling, nautical equipment, design, calculation, anchoring, obturation, sedimentation, refurbishment.

## RÉSUMÉ

*L'obturation des pertuis immergés de barrage par des moyens subaquatiques peut s'avérer nécessaire pour réaliser des travaux de maintenance à sec : inspection, réparation ou remplacement des vannes et/ou pièces fixes, travaux de peinture, soudure ou bétonnage. C'est le cas notamment en l'absence de vanne d'isolement fonctionnelle ou si des réparations doivent être menées en amont de celle-ci. Grâce à l'obturation, l'exploitant du barrage peut maintenir la retenue amont à un niveau normal pour éviter les pertes de stockage d'eau, de production hydroélectrique et assurer la continuité de la gestion des crues. La conception et la fabrication de l'obturateur doivent tenir compte d'un ensemble de paramètres dont notamment : la forme et l'état de l'ouvrage béton, le manque de visibilité des scaphandriers pour opérer, les choix techniques pour l'ancrage et l'étanchéité et tous les moyens logistiques pour le transport sur site, la manutention, le montage, le forage des ancrages et si nécessaire, le bétonnage. Pour assurer une bonne étanchéité de l'ensemble d'obturation et transmettre correctement les descentes de charges au génie civil, il peut s'avérer nécessaire d'installer au préalable un cadre fixe scellé avec du mortier. Un point à ne pas négliger est la vérification de l'auto-résistance du pertuis à la pression extérieure. Même en présence d'un blindage, la stabilité de celui-ci peut être insuffisante car non prévue pour ce cas de charges déséquilibré après la vidange du pertuis. Dans ce cas, des étais ou des renforts devront être installés en aval de l'obturateur.*

## ABSTRACT

*The obturation of an underwater sluice, bottom outlet, or water intake, with subaquatic means, is a way to perform the refurbishment of existing facilities and equipment for dams, especially for dry inspections, gate maintenance or reparation/painting of the lining or embedded parts. The obturation avoids the drainage of the full reservoir and all the associated losses: floods management, hydroelectric production, water supply. This can be a solution also if the sluice has no functional maintenance gate or if the refurbishment includes the upstream equipment's (steel lining, trash rack, concreting). The design and construction of these obturators must consider the Civil Works environment (shape and condition), the lack of underwater visibility of the divers, the anchoring system, the sealing and all the logistic for the transportation, handling, erection, drilling, and grouting. The efficiency of the watertightness and the transmission of the thrust loads on the existing Civil Works might require the addition of an embedded frame with grouting. Another issue to consider properly is the self-resistance of the sluice against external pressure, directly downstream the obturator. Even if the sluice has a steel liner, its embedding with the concrete structure or its thickness might not be sufficient to avoid a collapse after dewatering of the sluice. In this case, stiffener rings or stabilization girders must be added, downstream of the obturation.*

## 1. INTRODUCTION

Un problème récurrent dans l'entretien des barrages est de procéder à la remise en état des équipements de prise d'eau ou de vidange de fond sans abaisser le niveau d'eau dans le réservoir et maintenir une exploitation presque normale du barrage (production de la centrale hydroélectrique, approvisionnement en eau, irrigation).

Si l'équipement concerné n'a pas de batardeau ou de vanne d'isolement, une solution consiste à fournir un batardage provisoire de chantier ou un obturateur et d'adapter sa conception à la forme du Génie Civil. Dans cette configuration, les travaux lourds peuvent être réalisés en aval dans un environnement sec, comme le bétonnage, le soudage ou la peinture.

La société Hydrokarst est spécialisée en hydromécanique (ingénierie, fourniture, montage de vannes de barrage et de conduites forcées), en travaux subaquatiques et autres travaux d'accès difficiles (sur cordes ou en milieu confiné).

Grâce à son équipe d'ingénierie intégrée, à ses scaphandriers et cordistes professionnels, Hydrokarst cumule plusieurs expériences réussies en matière d'obturation en Europe et en Afrique, et d'autres sont à venir. Ses références se retrouvent sur les barrages suivants : l'Hongrin et Punt dal Gall (Suisse), Idriss I (Maroc) et Hautefage (Corrèze), Al Massira (Maroc, travaux en cours), At-Bachy (Kirghizistan, avant-projet), Nangbeto (Togo), Raggal (Autriche, travaux en cours), Bou Heurtma, Laroussia (Tunisie), Kariba (Zambie-Zimbabwe), Rochebut (Allier), Pannecières (Nièvre), Basse-Maulde (Haute-Vienne), et plus encore.

Pour garantir la meilleure conception et l'efficacité de l'étanchéité, une analyse de la documentation disponible sur le génie civil et le blindage est indispensable, complétée, si nécessaire, par des inspections subaquatiques préliminaires avec scaphandriers et/ou ROV avec scan acoustique.

Selon les conditions d'accès, l'obturateur est conçu en un ou plusieurs éléments manutentionnés par des moyens nautiques (pontons, treuil) et une grue mobile. L'étanchéité est adaptée soit directement sur le béton, soit avec une pièce fixe intermédiaire préalablement ancrée dans le béton.

Des problèmes de stabilité sont rencontrés si le conduit principal n'est pas conçu pour supporter une pression externe, même s'il est revêtu d'acier. La conséquence directe est la mise en place de poutres de stabilisation pour équilibrer la poussée externe imposée par la retenue sur conduit isolé et vidangé.

Dans cet article, nous exposerons différentes conceptions et méthodologies d'installation de ces équipements très particuliers (assemblage subaquatique, ancrage).

## 2. IMPLANTATIONS TYPIQUES DES OBTURATIONS ET LEUR INTERET

Les obturateurs sont généralement installés par les scaphandriers sur la face amont du mur du barrage, par-dessus la prise d'eau. Cette implantation est la plus pratique pour la manutention depuis la surface avec des moyens externes (grue, treuil) et elle est plus sûre pour les scaphandriers qui installent et manipulent les outils. La poussée hydraulique est directement transmise à la paroi. Le principal inconvénient est qu'une grande dimension peut être nécessaire en raison de l'élargissement en forme de tulipe que l'on observe généralement au niveau de l'entonnement des prises d'eau. La sédimentation dans cette zone peut également constituer un problème pour l'ancrage et le scellement de la partie inférieure de l'obturateur.

Ce type d'implantation en applique amont a été utilisé pour créer une nouvelle prise d'eau sur le barrage Idriss I<sup>er</sup> au Maroc (voir figure 1) : l'obturateur de 4,5 m de diamètre est installé contre une pièce fixe, en applique sur le parement amont en béton brut, avant qu'un forage débouchant de 2 m de diamètre ne soit réalisé depuis l'aval à travers l'épaisseur du mur du barrage pour implanter une conduite en acier pour la nouvelle prise d'eau.



Figure 1 : Retrait par grue de l'obturateur de 4,5 m de diamètre sur le barrage Idriss I<sup>er</sup> (Maroc)

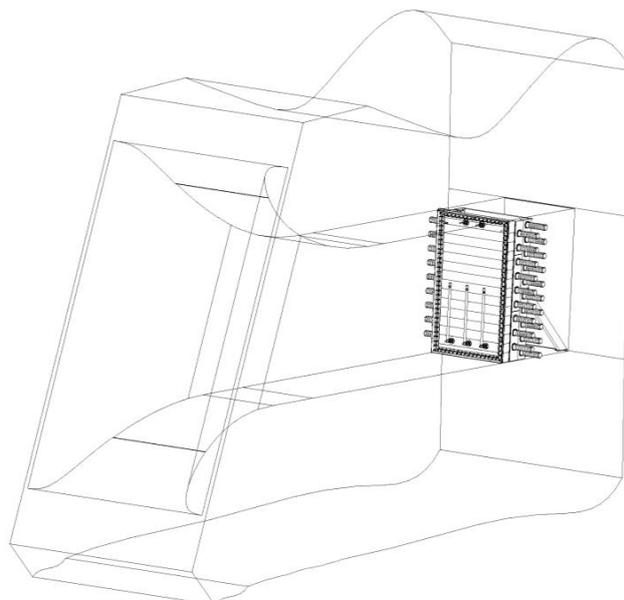


Figure 2 : Obturateur installé dans un des pertuis blindés de vidange de fond du barrage d'Al Massira (Maroc)

Une implantation de l'obturateur à l'intérieur du pertuis peut être choisie pour en réduire la taille, pour éviter la sédimentation en amont ou pour empêcher la partie amont du pertuis de s'affaisser si elle n'est pas auto-résistante à la pression externe. Un exemple est donné (figure 2) sur le barrage d'Al Massira au Maroc. L'inconvénient est d'amener les éléments d'obturation à l'intérieur du pertuis sans l'aide d'une grue ou d'un treuil depuis la surface. Dans ce cas, l'obturateur est systématiquement conçu en plusieurs éléments structurels que les scaphandriers peuvent manipuler dans le pertuis. Pour faciliter la manutention, les éléments peuvent être soit conçus avec un caisson étanche, éventuellement équipé d'un système de ballastage, soit attachés à des unités de levage gonflables (dits parachutes) ou à des bouées rigides. Le poids apparent de l'élément sera alors allégé, voire annulé.

Les obturations peuvent être installées sous l'eau par les scaphandriers à n'importe quelle profondeur sur le parement du barrage, depuis la surface libre jusqu'à 100 m de profondeur et même plus. Une fois obturé et vidangé, le pertuis est accessible pour les travaux à sec tels que les opérations de soudage et de peinture, l'inspection linéaire du pertuis avec mesure d'épaisseur et essais non destructifs, l'examen des arrivées d'eau à travers le béton, la remise en état des vannes, des pièces fixes, etc. Les variations de niveau du réservoir n'auront pas d'impact sur la zone de travaux à sec, de sorte que les opérations des autres installations du barrage peuvent être maintenues (évacuation de crues, débit réservé, approvisionnement en eau, production hydroélectrique) tant que l'obturation reste en place.

Pendant l'installation et l'enlèvement de l'obturation une vigilance sur le niveau de la retenue est nécessaire pour la sécurité des scaphandriers. Les débits d'entrée dans les vannes adjacentes doivent également être réduits ou stoppés tant que les scaphandriers sont en intervention.

### 3. LES DIFFERENTS TYPES D'OBTURATIONS

Différentes conceptions d'obturateurs peuvent être proposées, en fonction des dimensions globales, de la résistance à la pression, du nombre d'éléments, des zones de l'ouvrage de génie civil qui peuvent supporter la charge et des travaux de maintenance à réaliser.

Dans un premier temps, un batardage classique avec une structure en acier soudée renforcée peut être proposée, en particulier pour les obturations rectangulaires. Elle peut être simplifiée par une conception de type poutres de batardage (empilage jointif de poutres horizontales en acier) afin de gagner en temps de fabrication. Ces obturateurs peuvent être conçus en plusieurs éléments (voir figure 5) afin de correspondre à des capacités de levage et de transport raisonnables. Cette conception convient pour transférer les charges sur les rives droite et gauche de la structure en béton. Dans ce cas, le seuil et le linteau ne sont pas chargés mais complètent le périmètre d'étanchéité.

Une solution alternative à l'utilisation de poutres horizontales est l'utilisation de poutres verticales, dites aiguilles. Il permet de charger le linteau et le seuil de la superstructure béton au lieu de charger les rives. Cela peut être utile pour manipuler les éléments dans un puits vertical ou à travers une petite trappe au-dessus de la prise d'eau. Un exemple d'aiguilles verticales est illustré sur la figure 3 avec l'installation de 11 aiguilles de 35 m de haut sur l'un des pertuis de l'évacuateur de crue du barrage de Kariba, chaque aiguille étant divisée en deux parties et assemblée sur place à l'aide d'un portique de 25 m de haut spécialement conçu à cet effet. La figure 8 montre un autre exemple sur la vidange de fond du barrage de Bou Heurtma avec une obturation de 5 m de haut par 3,5 m de large composée de 11 aiguilles.

Pour une obturation dans un pertuis de type canal, on peut utiliser un mur de palplanches en appui sur le radier (pièce fixe de seuil à créer) et soutenu par une ou plusieurs poutres horizontales (liernes). Un exemple est montré dans la figure 4, avec une obturation de 15 m de haut sur le barrage de Laroussia (ou El-Aroussia, Tunisie).

Pour les obturations circulaires, il est possible d'alléger la conception afin d'optimiser l'assemblage et la manipulation en milieu subaquatique. La structure en acier est basée sur un fond bombé normalisé (elliptique ou « GRC » grand rayon de carre) que l'on trouve couramment sur les appareils à pression (voir les figures 1 et 13). Si la conception nécessite de diviser l'obturateur en plusieurs éléments, une forme plate sera préférée pour simplifier l'étanchéité entre éléments.

Des obturations spéciales peuvent être proposées, comme des batardeaux-puits ou batardeaux-tunnel (voir figure 6), en particulier pour les rénovations locales telles que les rainures de vanne ou les seuils.

D'autres conceptions (non représentées ici) peuvent être proposées, comme un obturateur hémisphérique qui peut prendre appui directement dans un convergent conique ou un entonnement elliptique de révolution.



Figure 3 : Aiguilles de batardage de 35 m de haut installées sur deux pertuis d'évacuateur de crue du barrage de Kariba (Zambie-Zimbabwe)



Figure 4 : Rideau de palplanches H\*L = 15 m x 12 m sur l'évacuateur de crue du barrage de Laroussia (Tunisie)

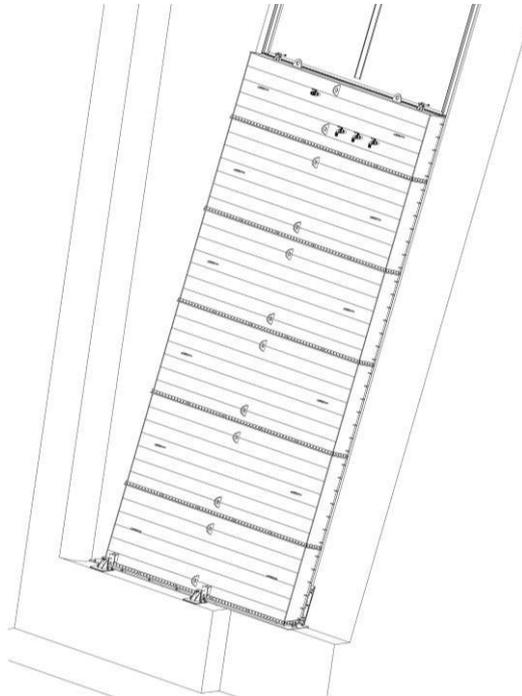


Figure 5 : batardage par 6 éléments horizontaux sur la prise d'eau du barrage de Nangbeto (Togo)

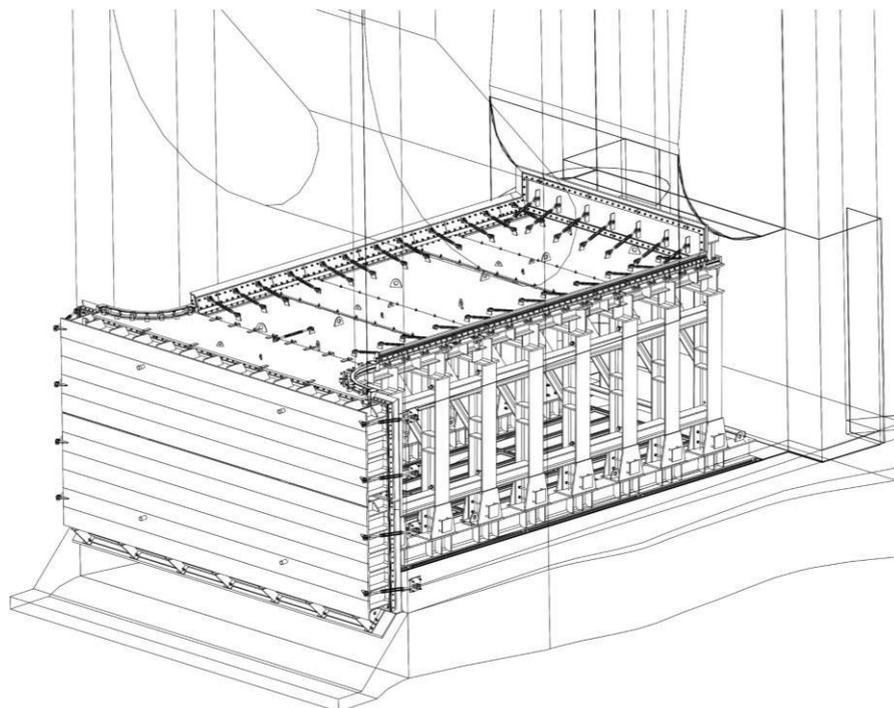


Figure 6 : Etude d'une solution d'obturation du type batardeau-tunnel ( $H = 42$  m CE ;  $H \times L \times P = 4$  m x 6 m x 10 m)

#### 4. INSPECTIONS PRELIMINAIRES ET PREPARATION DE LA ZONE DE TRAVAUX

Pour préparer la conception de l'obturation, une inspection préliminaire de la prise d'eau est nécessaire pour vérifier l'état général du béton, la présence de sédiments ou de débris et réaliser des relevés. Elle permettra de constater des désordres structuraux, de confirmer les principales dimensions de la prise d'eau et de les comparer aux dessins originaux, le cas échéant.

L'examen peut être réalisé par des scaphandriers et/ou avec un ROV. Dans la mesure du possible, un scan acoustique en 3D est réalisé, en particulier lorsque la visibilité est faible. Cela facilitera la conception de l'obturateur, confirmera les dimensions en 3D et permettra aux scaphandriers de gagner du temps en évitant de faire eux-mêmes des mesures précises.

Sur la figure 7, on peut voir la forme générale de la vidange de fond du barrage de Bou Heurtma en Tunisie, superposée au nuage de points issu du scan 3D subaquatique avec la caméra acoustique du ROV. Plusieurs différences dans la forme de la prise d'eau peuvent être trouvées et la hauteur des sédiments déposés sur le seuil peut être mesurée. La conception finale de l'obturateur peut ainsi être adaptée aux dimensions réelles de la prise d'eau et éviter l'adaptation de la taille des éléments d'obturation sur le site.

Avant l'intervention pour l'obturation, des travaux préliminaires peuvent être nécessaires tels que l'enlèvement des sédiments et débris par les scaphandriers et/ou moyens mécanisés (grappinage, air-lift).

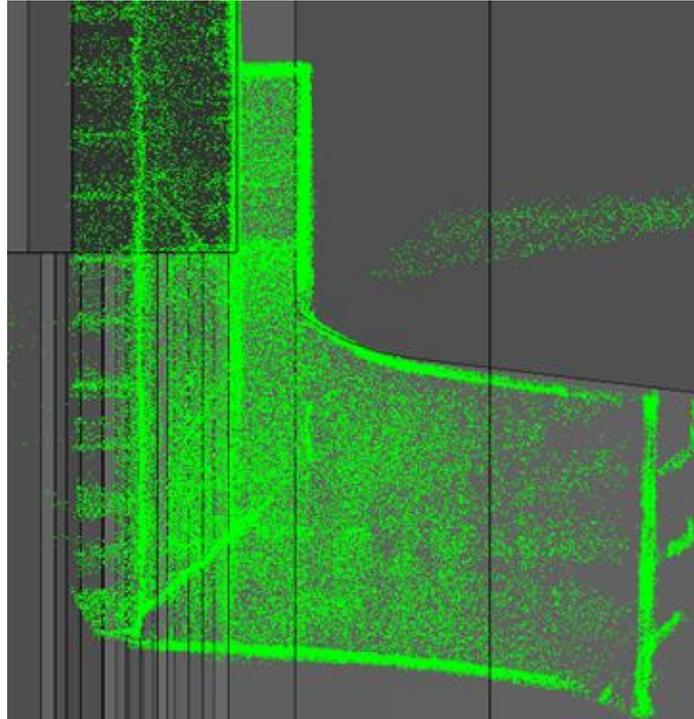


Figure 7 : Forme théorique de la prise d'eau superposée au scan acoustique 3D (Bou Heurtma)

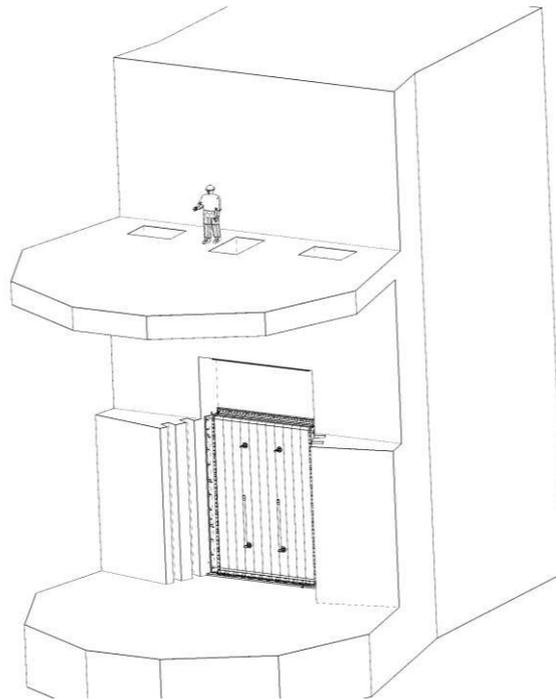


Figure 8 : Concept d'obturateur à aiguilles verticales (barrage de Bou Heurtma – Tunisie)

## 5. SOLUTIONS D'ANCRAGE ET D'ÉTANCHEITE

Les obturations en applique amont doivent s'adapter à la surface du béton et, si l'état général du béton est mauvais ou si la forme à épouser est complexe, un cadre de pièce fixe peut s'avérer nécessaire. Le cadre contribuera également à répartir la charge contre la paroi béton. Le cadre est fixé à la superstructure béton par ancrages chimiques à l'aide d'un perforateur ou d'une carotteuse et un coulis est injecté entre le cadre fixe et le béton existant pour assurer l'étanchéité et le transfert de charge.

Les obturations en applique amont ne nécessitent pas d'ancrages lourds car la poussée hydrostatique est directement transmise à la surface du béton par compression. Il convient néanmoins de vérifier la pression de contact sur le béton. Pour les obturations placées à l'intérieur des pertuis, si une surface convergente n'est pas disponible, l'ancrage latéral de l'obturateur peut être lourd car il doit résister à la poussée sur chaque côté en cisaillement. La figure 9 montre un détail de l'obturation de la vidange de fond d'Al Massira, avec plusieurs pions de cisaillement scellés dans le béton à travers le blindage acier existant.

L'étanchéité de l'obturation sera adaptée en fonction de l'utilisation ou non d'un cadre de pièce fixe. Pour un appui direct sur le béton, le joint sera choisi de grande dimension, comme les joints en caoutchouc de type joint cornière ou section D, afin de tolérer la surface rugueuse et irrégulière du béton et de gagner en compression et en efficacité. Avec le support d'un cadre fixe en acier, l'étanchéité peut être plus compacte, avec des joints en caoutchouc plats ou de type note de musique. L'assemblage du cadre fixe et de l'obturateur avec les joints peut être testé dans un montage à blanc en atelier.

Dans le cas d'obturateurs à éléments multiples, tels que des empilages d'éléments horizontaux ou d'aiguilles, l'étanchéité peut être réalisée grâce à une membrane de caoutchouc sur toute la surface. Si nécessaire, l'étanchéité sera complétée par les scaphandriers avec une résine malléable du type Epicol®.

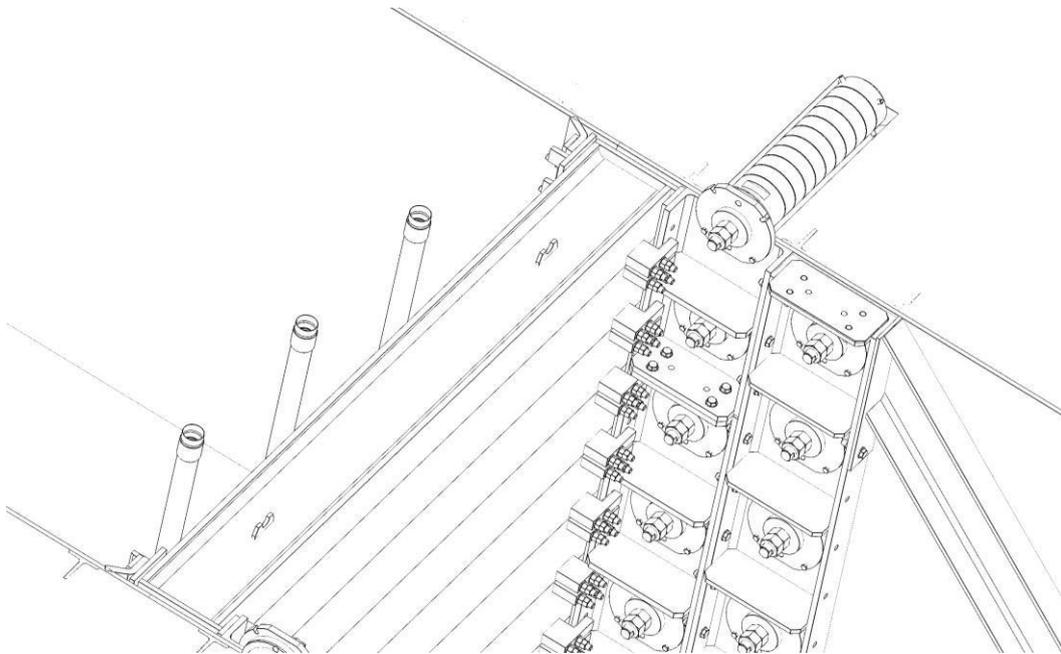


Figure 9 : Vue en coupe des pions d'ancrage de l'obturateur à travers le blindage du pertuis (Al Massira - Maroc)

## 6. MOYENS NAUTIQUES ET SUPPORTS AUX TRAVAUX DE PLONGÉE

Les scaphandriers ont besoin d'équipements spéciaux sur site, comme des pontons, un système de survie, des treuils pour la manutention des charges et la translation des pontons, des générateurs et compresseurs pour les outils pneumatiques ou hydrauliques.

La technologie de plongée est adaptée à la configuration de chaque obturation, dont l'installation peut prendre un jour ou plusieurs semaines en fonction de la complexité et de la profondeur des travaux subaquatiques en hyperbarie. Une analyse économique doit être faite pour choisir entre les 3 types de plongée :

- Plongée au narguilé
- Plongée bulle (« wet bell », voir figure 10)
- Plongée en saturation (Figure 11)



Figure 10 : Ponton entièrement équipé pour la plongée bulle (wet bell)

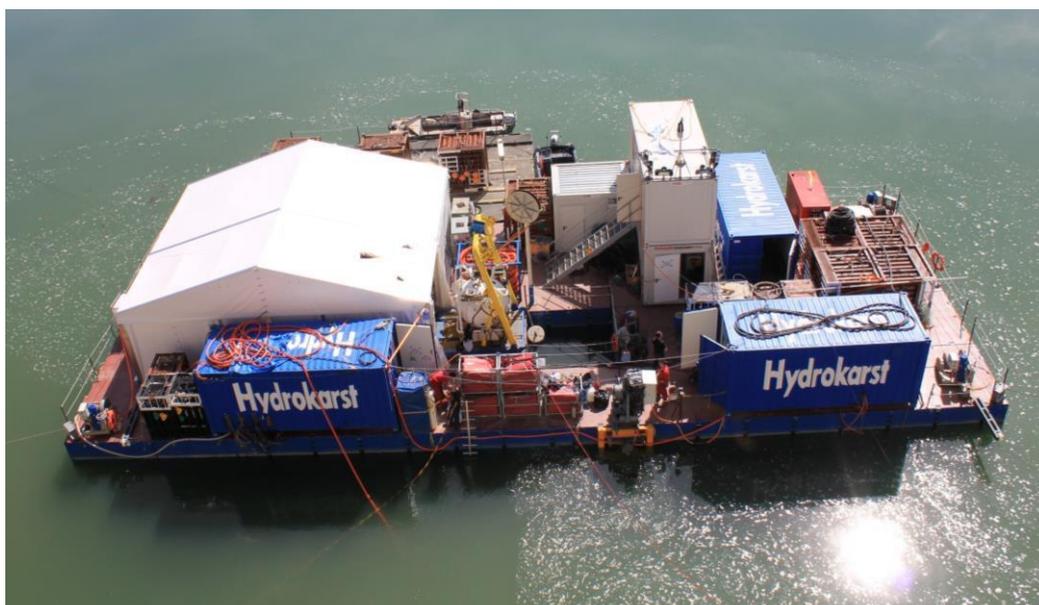


Figure 11 : Ponton équipé pour la plongée en saturation

## 7. EQUIPEMENTS SPECIAUX POUR LES OBTURATIONS

L'obturateur est fourni avec des accessoires tels que des oreilles de levage, des goupilles de centrage et, pour aider les scaphandriers avec la faible visibilité sous l'eau, des gabarits de perçage peuvent être prévus. Un montage à blanc en atelier est généralement nécessaire avant le montage sur site ; cela peut être aussi une bonne occasion pour l'équipe de scaphandriers de connaître l'équipement et s'entraîner à son montage.

Pour que la vidange du pertuis et sa remise en eau se déroulent correctement, l'obturateur est équipé d'orifices d'aération au sommet et de vannes de by-pass à son pied. L'admission d'air est nécessaire pour la vidange du pertuis ; un tuyau flexible est donc connecté à l'évent d'air jusqu'à la surface libre du réservoir. Les vannes d'entrée sont ouvertes par le scaphandrier pour la remise en eau. Le tuyau d'entrée est prolongé en amont de la vanne pour éviter que le risque d'aspiration du scaphandrier lorsque celui-ci ouvre la vanne. Une ou plusieurs vannes manuelles de deux pouces sont généralement utilisées.

En aval de l'obturateur, après la vidange du pertuis, la pression intérieure ne s'équilibre plus avec la pression extérieure. La partie du pertuis, entre la grille et la vanne de maintenance, n'est généralement pas auto-résistante à la pression extérieure dans la conception originale du barrage. La stabilité du conduit, avec ou sans blindage acier, doit être vérifiée. Si nécessaire, les scaphandriers installeront des poutres de stabilisation contre le blindage acier pour éviter qu'il ne s'affaisse. En général, nous utilisons des poutres tubulaires avec une vis-bouton pour s'adapter correctement à la dimension du pertuis. Les tubes peuvent être divisés en plusieurs parties avec brides boulonnées pour limiter le poids et la taille de l'unité. Pour réduire le poids apparent avec la flottabilité, les tubes peuvent être soudés étanches, ou remplis de mousse cellulaire à cellules fermées. Les poutres de stabilisation (4 m de haut par 2,5 m de large), utilisées sur le blindage acier de vidange de fond du barrage Al Massira Maroc, sont illustrées à la figure 12.

Un cadre de transport spécifique (figure 13) et un portique de chantier (figure 14) peuvent également être nécessaires.

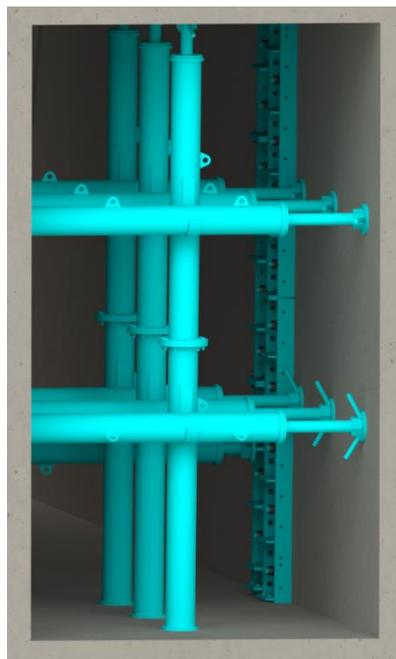


Figure 12 : Jambes de force pour stabiliser le blindage rectangulaire contre la pression extérieure (Al Massira - Maroc)



Figure 13 : Transport de l'obturateur circulaire sur un châssis adapté vers le barrage de l'Hongrin (Suisse)



Figure 14 : Portique de chantier manutentionnant une demi-aiguille de 20 t sur le barrage de Kariba (Zambie-Zimbabwe)

## 8. TABLEAU RECAPITULATIF DES REFERENCES CITEES

Projet	Type obturation	Hauteur d'eau	Dimensions & masses	Budget & délai
Al Massira – Maroc 2022-2024	A l'intérieur du pertuis VDF. Multi-éléments horizontaux, sur appuis latéraux scellés dans le blindage existant	54,5 m CE	H 4 m x L 2,3 m ~11,5 t	6 obturations & 2 jeux approvisionnés : 7 M€ & 24 mois
Bouheurtma – Tunisie 2023-2024	Dans l'entonnement VDF Aiguilles verticales en appui sur frontale et pièce fixe scellée en seuil	41,3 m CE	H 5 m x 3,6 m ~13 t	1 obturation : 1,55 M€ & 3 mois
Nangbeto – Togo 2022-2023	En applique amont. Multi-éléments horizontaux en appuis sur rails de roulement du dégrilleur.	29 m CE	H 12 m x L 5,5 m ~34 t	1 obturation : 1,3 M€ & 2 mois
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'Hongrin-CH 2012</li> <li>• Idriss I<sup>er</sup>-MA 2021</li> <li>• Hautefage-FR 2021</li> </ul>	Fond bombé en applique amont avec bride et joint creux sans pièce fixe (CH) et avec (MA + FR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 70 m CE</li> <li>• 35 m CE</li> <li>• 38 m CE</li> </ul>	Ø4,5 m ~10 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 obturations CH en saturation, avec 2 appros et retrait : 3,5 M€ &amp; 6 mois</li> <li>• 1 obturation MA + retrait : 1 M€ &amp; 2 mois</li> <li>• 1 obturation FR + retrait : 0,45 M€ &amp; 3 mois</li> </ul>
Laroussia – Tunisie 2022-2024	Palplanches avec liernes d'appuis, pièces fixes latérales et seuil	15 m CE	H 15 m x L 14 m ~260 t /pertuis (amont + aval)	1,3 M€ pour 2 pertuis & 2 mois par pertuis + 1 mois de démontage
Kariba Spillway – Zambie/Zimbabwe 2021-2025	Aiguilles verticales en 2 parties avec poutres de suspension et traverses d'appui	31,5 m CE	H 35 m x L 11 m ~550 t /pertuis	17 M€ pour fourniture portique de levage et travaux subaquatiques sur 6 pertuis, hors fournitures aiguilles & 2 mois pour le transfert des aiguilles entre 2 pertuis

## 9. CONCLUSION

Des solutions d'obturation peuvent être trouvées dans la plupart des cas. Une analyse technique et économique doit être effectuée précisément pour confirmer la faisabilité et plusieurs scénarios doivent être étudiés pour sélectionner le plus compétitif et sûr (optimisation du nombre d'ancrages, facilité d'accès des plongeurs, sollicitation des superstructures existantes, etc.).

Une inspection préliminaire du site à l'aide de scaphandriers et/ou de ROV est nécessaire avant de figer la conception finale du système d'obturation.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les équipes de plongée d'HYDROKARST pour les photos et les précisions techniques, notamment Renaud Rey, l'équipe du Bureau d'Etudes SDEM pour les supports CAO et notre assistante commerciale et chargée de communication, Mélanie Vizzini, pour son aide sur cet article.