

Réhabilitation de barrages face aux enjeux de sécurité et environnementaux – Pistes pour le recyclage et réemploi de matériaux

Claudio CARVAJAL¹

¹INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France

RESUME Les barrages permettent le stockage de l'eau notamment pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, l'hydroélectricité, le soutien d'étiages et la protection contre les inondations, constituant ainsi des pièces fondamentales pour le développement des populations dans un contexte de changements globaux. Cet article présente d'abord le contexte du parc des barrages qui se traduit par une nécessité de prolonger au maximum la durée de vie des ouvrages existants, tout en répondant aux exigences croissantes en termes de sécurité des personnes et des préoccupations environnementales. L'article présente ensuite plusieurs types de solutions de réhabilitation et confortement de barrages, en abordant l'amélioration des conditions de stabilité, mais aussi la modernisation des équipements hydromécaniques et la surélévation de barrages. En dernière partie, l'article présente des opportunités en termes de recherche et de développements techniques autour du recyclage et du réemploi de matériaux pour la construction ou réhabilitation des ouvrages hydrauliques.

Mots-clefs : confortement de barrages, développement durable, recyclage

I. INTRODUCTION

Les barrages sont des éléments cruciaux de nos infrastructures, fournissant de l'eau potable, de l'énergie, et jouant un rôle essentiel dans la régulation des ressources en eau. Le rôle des barrages est particulièrement important dans un contexte de changements globaux, d'augmentation de demande de ressources en eau ainsi que de mitigation et adaptation au changement climatique. Avec une population mondiale en croissante, les barrages contribuent à l'approvisionnement en eau potable et à la sécurité alimentaire en fournissant de l'eau pour l'irrigation des terres agricoles. Face à une demande croissante en énergie, les barrages fournissent une énergie électrique renouvelable et stable, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Dans un contexte de changement climatique caractérisé par des phénomènes météorologiques extrêmes, les barrages peuvent contribuer à l'atténuation des effets des sécheresses et à la protection contre les inondations, jouant ainsi un rôle essentiel dans l'adaptation aux impacts climatiques.

En contrepartie, les barrages peuvent avoir différents impacts négatifs sur les populations et sur l'environnement. Les barrages doivent ainsi respecter des fortes exigences environnementales

afin de minimiser les impacts écologiques et sociaux liés à la construction et l'exploitation de ces ouvrages. Les barrages doivent également respecter des fortes exigences de sécurité compte tenu des risques associés à une éventuelle rupture de barrage. Face à l'évolution des normes de sécurité et aux défis environnementaux croissants, de nombreux barrages à travers le monde sont confrontés à des enjeux complexes. La nécessité de réhabiliter ces structures devient une priorité incontournable pour garantir leur résilience face aux risques naturels et pour répondre aux exigences croissantes en matière de durabilité environnementale.

Cet article commence par donner un aperçu du parc mondial de barrages : nombre d'ouvrages, utilisation et rôle sur le développement de la société, diversité de types d'ouvrages et durée de vie en service de barrages. L'article présente ensuite les enjeux de sécurité et environnementaux auxquels sont confrontés les barrages, tout en mettant en lumière l'importance cruciale de la réhabilitation pour assurer leur fonctionnement optimal dans le contexte actuel. Après mentionner plusieurs types de solutions de réhabilitation et confortement de barrages, l'article présente finalement des pistes et possibilités de recyclage et de réemploi de matériaux pour la construction ou réhabilitation des ouvrages hydrauliques.

II. PARC DE BARRAGES

La Commission Internationale des Grands Barrages ICOLD présente un registre recensant presque 62 000 grands barrages dans le monde. La notion de grand barrage pour la ICOLD correspond essentiellement à des barrages de hauteur supérieure à 15 m. Entrent aussi dans cette catégorie, les barrages de 5 à 15 m de hauteur qui stockent plus de 3 millions de m³ d'eau.

Les barrages constituent des réservoirs permettant le stockage de l'eau pour l'irrigation de terres agricoles, l'alimentation en eau potable, la production d'énergie électrique, la régulation des cours d'eau, le soutien d'étiages, les activités touristiques, la navigation et la protection contre les inondations. Ainsi, les barrages contribuent significativement à la gestion des ressources en eau et à satisfaire des nombreux besoins essentiels pour le développement de la société. Dans le registre de l'ICOLD (ICOLD 2024) et en excluant les barrages de résidus miniers, la plupart des grands barrages hydrauliques ont comme rôle principal l'irrigation (37%), ensuite l'hydroélectricité (18%), l'alimentation en eau potable (14%), la protection contre les inondations (13%), les activités touristiques (8%), la pisciculture et navigation (5%) et autres usages (5%). Sur ce parc d'ouvrages, presque la moitié des barrages ont des rôles multiples.

Le parc de barrages est riche en termes de typologie d'ouvrages : barrages en remblai (homogène, zonés, ...) en enrochements, barrages-poids, barrages à contreforts, barrages-voûtes, barrages à voûtes multiples, et des nombreuses configurations de barrages mixtes.

Certains barrages sont particulièrement emblématiques, tels que le barrage d'Assouan en Égypte, le barrage Hoover aux États-Unis, le barrage des Trois-Gorges en Chine, et le barrage d'Itaipu entre le Brésil et le Paraguay. Les barrages les plus hauts actuellement sont le barrage Jinping 1 (barrage voûte de 305 m de hauteur situé en Chine) et le barrage de Nurek (barrage en remblai de 300 m de hauteur situé au Tadjikistan). En France, le barrage le plus haut est le barrage de Tignes (barrage-voûte de 180 m de hauteur).

Le plus ancien des grands barrages dans le monde encore en service est le barrage de Proserpina, situé en Espagne. C'est un barrage romain en maçonnerie de 21 m de haut, construit en 130, qui se rapproche ainsi à presque 2 000 ans de fonctionnement. En France, les grands barrages les plus anciens sont Saint Ferréol (1675), Paty (1766) et Lampy (1782) (CFBR, 2024). Sur le parc d'environ 700 grands barrages en France, près de 60% ont été construits il y a plus de 50 ans et environ 10% datent de plus de 100 ans.

Alors que le parc de barrages comporte une part significative d'ouvrages âgés et que les attentes en matière de sécurité et de protection de l'environnement s'intensifient, prolonger la durée de vie des ouvrages existants est devenu un enjeu majeur.

III. EXIGENCES DE SECURITE ET ENVIRONNEMENTALES POUR LES BARRAGES

Les barrages contribuent significativement au développement de la société par la gestion des ressources en eau et ils doivent répondre à des fortes exigences de sécurité et environnementales. Ce chapitre commence par placer les barrages dans un contexte de développement durable en évoquant les principaux aspects positifs et négatifs d'un point de vue social, économique et environnemental. Ensuite, ce chapitre présente les principales exigences aux barrages en termes de sécurité des personnes et de protection de l'environnement.

A. Les barrages dans un contexte de développement durable

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. La notion de développement durable repose sur trois piliers (économie/écologie/social) qui se traduisent par : un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable.

Barrages et développement social

Parmi les points positifs vis-à-vis de la société, les barrages permettent l'irrigation des terres agricoles, contribuant à la sécurité alimentaire ; les barrages hydroélectriques génèrent de l'électricité propre, renouvelable et qui a l'avantage majeur de flexibilité pour pouvoir fournir de l'électricité en période de pointe (et d'arrêter la production en périodes creuses), contribuant significativement aux besoins énergétiques ; les réservoirs des barrages stockent l'eau pour l'approvisionnement en eau potable, répondant aux besoins croissants des populations ; les barrages contribuent également à la gestion des ressources en eau (permettant le stockage et protection contre les inondations en périodes de crue, et le soutien des cours d'eau en périodes de sécheresse ou étiage) ; les barrages joueront leur rôle pour réduire l'importance et les conséquences du réchauffement climatique (d'une part, l'hydroélectricité réduira la consommation de combustibles fossiles ; d'autre part, le réchauffement climatique accentuant les phénomènes de crues et de sécheresse).

Parmi les points négatifs vis-à-vis de la société, la création de barrages peut entraîner le déplacement de populations ou communautés locales, engendrant des problèmes sociaux et des répercussions sur les modes de vie. Les populations habitant en aval d'un barrage peuvent subir des répercussions sur leurs moyens de subsistance, y compris à une échelle internationale

(construction d'un barrage dans un pays limitant les ressources hydriques d'un autre pays situé en aval). Il y a également le risque imposé à la population en aval, lié à une éventuelle rupture de barrage.

Barrages et développement économique

Les barrages sont des ouvrages à grande envergure associés à des coûts élevés de construction. Sur la durée de vie de l'ouvrage (qui peut dépasser les 100 ans), s'ajoutent les coûts d'exploitation, de surveillance, d'entretien et de maintenance. Une dégradation importante de l'ouvrage ou une revue à la hausse des exigences de sécurité peuvent conduire également à la nécessité de travaux conséquents de réhabilitation ou de confortement qui entraînent des coûts élevés. Pour la fin de vie de l'ouvrage, il convient de considérer également les coûts de démantèlement du barrage et de restauration des milieux naturels.

L'efficacité d'un barrage d'un point de vue économique est assez variable et dépend généralement de l'utilisation de l'ouvrage. Les barrages hydroélectriques atteignent généralement leurs objectifs financiers avec une performance économique variable par rapport aux objectifs. Les barrages destinés à l'irrigation sont généralement peu ou pas rentables d'un point de vue économique. La situation est plus mitigée pour les barrages destinés à l'approvisionnement en eau à usage domestique ou industriel, lesquels peuvent présenter un mauvais niveau d'amortissement des coûts et des performances économiques médiocres. Les retombées économiques directes ou indirectes d'un barrage sur l'échelle d'un territoire (commune, région, ...) sont toutefois difficiles à quantifier.

Barrages et environnement écologique

Parmi les aspects négatifs, les barrages peuvent avoir des impacts sur les écosystèmes aquatiques : ils peuvent altérer les habitats naturels, perturber les migrations des poissons et causer des changements dans les écosystèmes aquatiques pouvant conduire à une perte de biodiversité. Les barrages peuvent entraîner la sédimentation des réservoirs, réduisant ainsi leur capacité de stockage et contribuant à l'érosion en aval. Le blocage du transport naturel des sédiments vers les zones en aval peut altérer la dynamique des cours d'eau. Des lâchers d'eau chargés en sédiments peuvent avoir également des impacts sur écosystèmes en aval. Les barrages peuvent altérer la température et la qualité de l'eau en aval, affectant ainsi les écosystèmes aquatiques. Les barrages peuvent influencer le cycle hydrologique naturel et avoir des impacts sur la disponibilité de l'eau en aval, ce qui peut être exacerbé par les changements climatiques. La décomposition de la matière organique dans les réservoirs peut libérer des gaz à effet de serre. Une éventuelle rupture de barrage peut entraîner de fortes conséquences sur l'environnement.

Les barrages peuvent avoir des aspects positifs sur l'environnement. Les réservoirs créés par les barrages permettent de stocker de l'eau, contribuant à la gestion des ressources hydriques (notamment dans les régions sujettes à la sécheresse). Les réservoirs peuvent créer de nouveaux habitats aquatiques, offrant des opportunités de biodiversité et de vie sauvage. Les barrages hydroélectriques produisent de l'énergie renouvelable, réduisant la dépendance aux sources d'énergies fossiles et contribuant à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. L'un des principaux avantages de l'énergie hydroélectrique est son faible bilan carbone. Selon les données du GIEC (IPCC, 2014), l'émission carbone sur le cycle de vie pour l'énergie hydroélectrique n'est que de 24 gCO₂eq/kWh. Ce chiffre [valeur médiane] est nettement inférieur à celui des sources

d'énergie basées sur les combustibles fossiles, comme le charbon (820 gCO₂eq/kWh) et le gaz (490 gCO₂eq/kWh). En comparaison à d'autres sources d'énergie non-fossiles, l'éolien terrestre affiche 11 gCO₂eq/kWh, l'éolien en mer 12 gCO₂eq/kWh, le nucléaire 12 gCO₂eq/kWh, les panneaux solaires sur toit 41 gCO₂eq/kWh et les fermes de panneaux solaires 48 gCO₂eq/kWh (IPCC, 2014).

B. Exigences de sécurité des barrages

Les exigences de sécurité des barrages sont cruciales en raison des risques potentiels associés à ces structures en cas de défaillance ou d'une éventuelle rupture. Ces exigences visent à garantir la stabilité et la fiabilité des barrages, minimisant ainsi les risques pour la vie humaine, les biens et l'environnement. Les principales exigences de sécurité d'un barrage concernent la sécurité structurale, la surveillance et l'entretien, le plan d'urgence et la gestion des risques.

Sécurité structurale : comme pour d'autres ouvrages de génie civil, ces exigences comprennent des études approfondies de site pour évaluer notamment les conditions géologiques, géotechniques et hydrologiques, permettant ensuite d'effectuer la conception et les justifications de stabilité structurale du barrage et de ses différents composants. Les phases de construction et de premier remplissage font l'objet de contrôles stricts sur les matériaux employés, les modes de construction et le comportement de l'ouvrage.

Surveillance et entretien : les barrages doivent faire l'objet d'inspections régulières par l'exploitant de l'ouvrage ainsi que d'inspections approfondies effectuées par des organismes spécialisés. La surveillance comporte également un dispositif d'auscultation incluant de nombreux capteurs (déplacement, déformation, pressions interstitielles, débits, ...) pour détecter tout signe de pathologie ou de comportement anormal d'un barrage. Les opérations de surveillance et d'entretien incluent également la vérification des organes de sécurité, la maintenance, réparation et remplacement des composants défectueux, la formation du personnel et les consignes d'exploitation en toutes circonstances.

Plans d'urgence : des plans d'urgence détaillés (ou Plans Particuliers d'Intervention, PPI) doivent être élaborés pour faire face à toute éventualité, telle qu'une inondation due à une défaillance ou une rupture du barrage. Ces plans doivent inclure des procédures d'évacuation (ou des liens avec des procédures d'évacuation existantes), des moyens de communication d'urgence et des protocoles de coordination avec les autorités locales.

Gestion des risques : une évaluation complète des risques doit être effectuée, tenant compte de la probabilité d'occurrence et des conséquences potentielles d'une défaillance du barrage ou d'un autre composant de l'ouvrage pouvant conduire à une libération d'eau non maîtrisée vers l'aval. Les mesures de gestion des risques doivent être mises en place pour minimiser ces risques dans la mesure du possible. Les barrages font l'objet de revues de sûreté régulières pendant toute leur vie en service afin de justifier et maintenir un niveau de risque acceptable. En France, les études d'analyse des risques et les revues de sûreté sont regroupées dans les études de dangers de barrages.

Ces exigences de sécurité des barrages varient d'un pays à l'autre en fonction des normes locales et des réglementations gouvernementales spécifiques. Il est crucial que ces exigences soient respectées tout au long du cycle de vie d'un barrage, de sa conception initiale à son exploitation continue. Par exemple, en France, la rupture du barrage de Malpasset a conduit à la

mise en place un Comité Technique Permanent des Barrages et Ouvrages Hydrauliques (CTPBOH) constitué d'experts et chargé de donner son avis sur tous les projets de grands barrages (choix du site, type d'ouvrage, crue de projet, conception, dispositif d'auscultation, etc.). Plus récemment, la réglementation française sur les exigences de sécurité des barrages s'est fortement renforcée depuis le décret du 11/12/2007 (MEDAD, 2007), modifié ensuite par le décret du 12/05/2015 (MEDDE, 2015), et ses arrêtés d'application.

Sur la longue durée de vie d'un barrage, les exigences de sécurité peuvent être revues à la hausse par l'apparition ou renforcement des réglementations. Ceci peut conduire à la nécessité d'effectuer des travaux de confortement de barrages pour prolonger la durée de vie de ses ouvrages en respectant les nouveaux standards de sécurité. Les barrages à réhabiliter doivent répondre normalement aux mêmes exigences actuelles de sécurité des barrages neufs. Une spécificité consiste à justifier également les conditions de stabilité du barrage pendant la phase transitoire du chantier de confortement ou réhabilitation de l'ouvrage.

Pour plus de détails, le lecteur peut consulter le bulletin 175 de la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD, 2021), portant sur la gestion de la sécurité des barrages pendant les phases de conception, construction et vie en service.

C. Exigences environnementales pour les barrages

Les exigences environnementales pour les barrages visent à minimiser les impacts écologiques et sociaux associés à la construction et à l'exploitation de ces structures. Ces exigences sont conçues pour protéger les écosystèmes aquatiques, préserver la biodiversité, maintenir la qualité de l'eau et atténuer les effets sur les communautés locales. Ce paragraphe présente quelques-unes des principales exigences environnementales pour les barrages.

Étude d'impact environnemental (EIE) : Avant la construction d'un barrage, une EIE approfondie doit être réalisée. Cette étude évalue les impacts potentiels du barrage sur l'environnement, y compris les habitats aquatiques, la faune, la qualité de l'eau, les sols, et les communautés humaines.

Conservation des habitats : les exigences peuvent stipuler la nécessité de préserver les habitats naturels existants, tels que les zones humides, les forêts et les habitats fauniques, autant que possible. Des mesures de compensation peuvent être envisagées pour les habitats perdus en raison de la construction du barrage.

Passages à poissons : pour minimiser l'impact sur les migrations des poissons, les barrages peuvent être équipés de dispositifs tels que des passes à poissons.

Gestion des sédiments : les barrages peuvent avoir un impact sur le transport des sédiments dans les cours d'eau, ce qui peut affecter les écosystèmes en aval. Les exigences peuvent inclure des mesures pour gérer les sédiments et maintenir la qualité de l'eau.

Débit écologique : pour maintenir les écosystèmes en aval, des débits écologiques minimums doivent normalement être respectés. Cela signifie qu'un certain volume d'eau doit être libéré en aval du barrage pour soutenir les conditions environnementales.

Compensation et réinstallation des communautés : si la construction du barrage nécessite la réinstallation de communautés, des exigences précises doivent être établies pour garantir des conditions de vie équivalentes ou meilleures pour les personnes déplacées.

Restauration post-construction : des plans de restauration post-construction peuvent être requis pour réhabiliter les zones impactées par la construction du barrage une fois que sa vie utile est terminée.

Ces exigences varient selon les pays, et leur mise en œuvre est essentielle pour assurer une gestion responsable des ressources en eau et la protection des écosystèmes et des communautés locales.

Les barrages qui doivent faire l'objet de travaux de réhabilitation doivent répondre également à des exigences environnementales de manière analogue aux projets de barrages neufs. Le projet de confortement d'un barrage fait l'objet notamment d'une étude d'impact environnemental qui intègre : l'analyse de l'état initial du site et de l'environnement ; l'analyse des impacts temporaires sur l'environnement (associés à la période de chantier des travaux de confortement) et des impacts permanents sur l'environnement (associés à la solution de confortement) ; ainsi que les mesures pour supprimer, réduire ou compenser les impacts du projet de confortement du barrage sur l'environnement. Cette étude d'impact environnemental comprend normalement l'analyse de différentes options ou variantes des solutions de confortement, ce qui peut conduire par exemple à privilégier une solution de confortement permettant d'éviter une vidange de la retenue pendant le chantier.

En effet, il y a des situations où le barrage est à l'origine d'un écosystème lié à la retenue. Ainsi, une vidange de la retenue effectuée de manière temporaire pendant le chantier de travaux de confortement (ou de manière permanente par mise en transparence ou effacement d'un barrage) peut avoir des impacts significatifs sur l'environnement.

Le lecteur est invité à consulter la charte de l'ICOLD sur les barrages et l'environnement (ICOLD, 2012) qui mentionne notamment les bulletins techniques et les congrès de l'ICOLD dédiés aux aspects environnementaux.

IV. REHABILITATION ET CONFORTEMENT DE BARRAGES

La réhabilitation et le confortement des barrages visent à renforcer la stabilité structurelle, à améliorer les performances opérationnelles et à prolonger la durée de vie utile des barrages existants. Plusieurs techniques peuvent être utilisées en fonction du type de barrage et des défis spécifiques rencontrés. Cette section présente quelques-unes des principales méthodes de réhabilitation et de confortement de barrages :

Abaissement du niveau de la retenue : elle permet d'abaisser les sollicitations hydrauliques sur le barrage. La contrepartie est une perte du volume utile de la retenue, qui n'est pas facilement compatible avec les contraintes d'exploitation. Cette diminution de la cote d'exploitation peut se faire de manière pérennisée par un arasement ou une échancrure au niveau du déversoir. L'option d'utiliser la vanne de prise ou de vidange n'est généralement pas assez fiable.

Traitement de l'étanchéité : il vise à stopper ou réduire les écoulements au sein de l'ouvrage afin de diminuer l'action des pressions interstitielles ou sous-pressions, de diminuer les sollicitations liées à l'érosion interne et de réduire la progression de pathologies en lien avec l'eau (dissolution de liants, alcali-réaction).

- Pour les barrages en remblai, le renforcement de l'étanchéité peut s'effectuer par la mise en place d'un écran étanche (comme une paroi moulée ou une paroi au coulis) installé depuis la crête du barrage, sans nécessité de vidanger la retenue pour réaliser ces travaux. Une autre option peut consister à la mise en place d'un masque amont, ce qui requiert une vidange de la retenue. Dans les deux cas, il convient d'envisager de prolonger l'étanchéité dans les fondations du barrage.
- Pour les barrages rigides (béton, maçonnerie), le renforcement de l'étanchéité peut s'effectuer par la mise en place d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) sur le parement amont de l'ouvrage. Ce DEG comporte généralement un géosynthétique drainant, un géotextile anti-poinçonnement et une géomembrane. L'installation du dispositif peut passer par des profilés métalliques qui permettent de fixer la géomembrane au parement amont et de mettre en tension la géomembrane. Le DEG s'adapte bien aux surfaces planes comme le parement amont des barrages-poids, mais aussi à des surfaces courbes comme le parement amont de barrages-voûtes ou contreforts à voûtes multiples. Une attention particulière doit être portée à l'étanchéité au niveau du contact barrage-fondation.
- Le renforcement de l'étanchéité des fondations rocheuses ou des fondations meubles est généralement effectué par la mise en place d'un rideau d'injections. Les produits d'injection (coulis bentonite-ciment ou coulis spéciaux) doivent être adaptés à la nature des matériaux des fondations. Le rideau d'injections peut comporter plusieurs lignes de forages placés en quinconce.

Renforcement du drainage : il vise à rabattre les pressions interstitielles ou sous-pressions dans le corps du barrage et/ou dans les fondations. Pour les barrages-poids, le renforcement du drainage consiste à forer des drains à partir de la galerie vers la fondation et/ou depuis la crête du barrage vers la galerie de drainage. Si le barrage n'est pas équipé de galerie, le forage des drains peut s'effectuer depuis la partie inférieure du parement aval et inclinés vers l'amont pour atteindre la fondation. On cherche à placer les drains vers l'amont où les sous-pressions sont les plus élevées, mais en restant suffisamment éloigné du rideau d'étanchéité pour éviter un claquage hydraulique. Les barrages-voûtes sont des ouvrages élancés et donc peu sensibles aux sous-pressions. Cependant, les fondations des barrages-voûtes peuvent être particulièrement sollicitées par les sous-pressions en fonction de la configuration des discontinuités du massif rocheux, et des drains peuvent être forés dans le rocher en aval immédiat de la voûte. Les barrages en remblai sont normalement équipés des drains en matériaux granulaires qui sont difficiles à reprendre après construction du barrage. Un complément du dispositif de drainage des barrages en remblai peut consister à la mise en place d'une recharge aval drainante ou des puits de décompression dans les fondations en pied aval du barrage.

Recharge aval : la mise en place d'un remblai en terre ou en enrochements en aval d'un barrage existant apporte une butée qui contribue à améliorer les conditions de stabilité au

glissement. Cette solution de confortement a été mise en œuvre sur plusieurs barrages-poids en maçonnerie suite à la rupture du barrage de Bouzey à la fin du XIX^{ème} siècle. Une couche de transition en matériaux granulaires drainants peut être envisagée entre la maçonnerie et le remblai de la recharge afin d'assurer le drainage des fuites de la maçonnerie. Pour le confortement de barrages en remblai, la recharge aval est normalement constituée de matériaux drainants ou au moins de perméabilité supérieure à celle du remblai initial. La pente globale du barrage conforté est normalement plus douce que celle du barrage initial. Une attention particulière doit être portée sur la zone de contact entre le remblai initial et la recharge, ainsi que sur la prolongation du dispositif de drainage jusqu'au pied aval du barrage conforté. La mise en place d'une recharge aval ne requiert pas de vidange de la retenue.

Tirants d'ancrages : le renforcement par tirants d'ancrages vise à améliorer les conditions de stabilité d'un barrage en ajoutant une tension d'ancrage sur la fondation. Pour un barrage-poids, les tirants d'ancrage permettent d'augmenter indirectement le poids de l'ouvrage grâce à la mise en tension de tirants précontraints entre la crête du barrage et le rocher de fondation. Plusieurs précautions sont nécessaires notamment pour le confortement d'anciens barrages-poids en maçonnerie. Des injections dans la maçonnerie et la fondation peuvent être envisagées avant l'installation des ancrages pour consolider et améliorer la résistance de la maçonnerie. Il convient également de limiter la tension des tirants afin de limiter les sollicitations mécaniques sur une maçonnerie ancienne et présentant des hétérogénéités. Une poutre en béton armé est généralement adoptée en crête du barrage pour recevoir les têtes d'ancrages et répartir les efforts de précontrainte. Les têtes des tirants peuvent être équipées de cellules dynamométriques pour le contrôle de la tension des tirants, et elles doivent permettre une remise en tension des tirants. Par ailleurs, le confortement par tirants d'ancrages présente l'avantage d'éviter de vider la retenue.

Augmentation de la capacité d'évacuation des crues : l'actualisation régulière des études hydrologiques (avec plus des données hydrologiques et pouvant intégrer des évolutions climatiques) et le renforcement des critères de sécurité peut conduire à la nécessité d'augmenter la capacité d'évacuation de crues d'un barrage existant. Parmi les différentes possibilités d'améliorer la capacité d'un évacuateur de crues on peut mentionner les solutions pour : améliorer le coefficient de débit (comme le profilage du seuil déversoir en seuil Creager par exemple) ; augmenter la longueur déversante en prolongeant le seuil déversant ou en remplaçant un seuil rectiligne par un seuil labyrinthe ou en touches de piano (PK-weirs) ; et augmenter la charge de déversement avec un abaissement du seuil accompagné de la mise en place d'organes mobiles (vannes clapet, segment, secteur) ou d'éléments fusibles (hausses fusibles). Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'aménager un nouvel ouvrage d'évacuation de crues.

Modernisation des équipements hydromécaniques : la durée de vie des équipes hydromécaniques comme les vannes de prise d'eau ou les vannes de vidange est généralement plus courte que la vie en service du barrage. Ces équipements peuvent faire l'objet de plusieurs opérations d'entretien, maintenance, modernisation ou remplacement pendant la vie en service d'un barrage. La présence de batardeaux ou de vannes de garde amont permet de réaliser des travaux de maintenance ou remplacement d'organes situés plus en aval (comme les vannes de réglage) sans nécessité d'abaissement du niveau de la retenue. La rénovation des organes situés

plus en amont peut s'avérer plus délicate, pouvant nécessiter dans certains cas une vidange complète de la retenue.

Surélévation : la surélévation des barrages consiste à augmenter la hauteur du barrage afin d'augmenter sa capacité de stockage d'eau. La possibilité de surélévation peut être considérée dans certains cas dès la phase de conception du barrage initial, ou bien, en réponse à des besoins croissants ou à de nouveaux besoins en matière de gestion des ressources hydriques. Les travaux de surélévation d'un barrage sont soumis à des exigences de sécurité et environnementales analogues à celles d'un projet de barrage neuf.

Pour plus de détails concernant le confortement de barrages en remblai et des barrages poids, le lecteur peut consulter les références CFBR (2021) et Dégoutte et Royet (2003). Pour aller plus loin, le lecteur peut se référer aux actes du colloque du CFBR de 2018 consacré à la maintenance et réhabilitation des barrages (CFBR, 2018).

V. PISTES POUR LE RECYCLAGE OU REEMPLOI DE MATERIAUX POUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Dès les phases de conception d'un barrage on vise à privilégier au maximum l'utilisation des matériaux du site afin d'éviter le transport sur des distances importantes de grands volumes de matériaux pour la construction ou le confortement d'un barrage. Des traitements spécifiques des sols peuvent être envisagés également afin de pouvoir utiliser les sols du site. Cette section présente quelques exemples de pistes de recyclage ou réemploi de matériaux envisageables dans le domaine des ouvrages hydrauliques.

A. Utilisation de cendres volantes :

Les cendres volantes sont des déchets industriels qui peuvent être utilisées pour la confection de béton en réduisant le dosage en ciment. Cette application est largement répandue pour la construction de barrages-poids en Béton Compacté au Rouleau (BCR). Les cendres volantes constituent un matériau important des barrages en BCR car elles permettent de réduire le dosage en ciment et réduire ainsi la chaleur d'hydratation. Pour donner un ordre de grandeur, le dosage en liant du béton de barrages-poids en BCR est de l'ordre de 120 kg/m^3 comportant environ 80 kg/m^3 de ciment et 40 kg/m^3 de cendres volantes. Le dosage en liant dans le BCR peut cependant varier significativement d'un barrage à un autre (par exemple : de 66 kg/m^3 pour le barrage Willow Creek à 252 kg/m^3 pour le barrage Upper Stillwater, tous les deux aux USA). Dans tous les cas, les volumes importants de BCR dans un barrage-poids conduit à la réutilisation de quantités significatives de cendres volantes.

B. Utilisation de graves recyclées de la démolition de bâtiments :

Le recyclage de graves issus de la démolition de bâtiments ne fait pas encore partie de la pratique courante de construction ou réhabilitation de barrages. L'auteur de cet article avait étudié l'opportunité de conforter un barrage-poids existant avec des graves recyclées, mais il n'a pas connaissance des cas de barrages effectivement construits ou confortés avec des graves recyclées.

Une piste potentielle peut consister à utiliser des graves recyclées pour la fabrication du béton de barrages-poids. Ces ouvrages massifs sont généralement peu sollicités en termes de résistance en compression et souvent dimensionnés pour éviter des efforts de traction (notamment en situation normale d'exploitation). Une attention particulière est nécessaire pour évaluer la résistance au cisaillement du béton confectionné avec des graves recyclées (notamment au niveau des joints ou reprises de bétonnage et à l'interface avec la fondation) ainsi que pour évaluer son comportement à long terme vis-à-vis des écoulements internes (une étanchéité complémentaire par une géomembrane amont pourrait être envisagée).

Une autre piste serait l'utilisation des graves recyclées pour la construction de barrages en remblai avec masque amont, ou pour la construction de recharges d'un barrage zoné. Pour le cas de barrages existants, les graves recyclées pourraient être utilisées comme matériau pour conforter un barrage existant par une recharge aval. Dans tous ces cas, il est nécessaire de porter une attention particulière au comportement mécanique et aux aspects environnementaux. Concernant le comportement mécanique, il convient de considérer par exemple : l'effet de la rugosité des granulats recyclés sur la résistance au cisaillement ; la présence d'une fraction de mortier de résistance généralement plus faible que celle des granulats ; l'éventuelle dissolution ou désagrégation de la fraction du mortier pouvant se traduire par une déformabilité plus importante à l'échelle de l'ouvrage ; ainsi que la question sur l'hétérogénéité des graves recyclées provenant de différents sites de démolition. Concernant les aspects environnementaux, il convient de tenir compte notamment de l'éventuelle dissolution ou désagrégation de la fraction du mortier qui pourrait se traduire par une libération de particules cimentaires vers le cours d'eau et impacter le milieu aquatique.

C. Réutilisation de polymères usagés :

La densité des matières plastiques est nettement plus faible que celle des matériaux généralement utilisés pour la construction de barrages (remblai ou béton). Ceci limite l'efficacité d'un éventuel confortement de barrages avec une recharge aval constituée de matériaux plastiques usagés. Le remploi de matières plastiques usagées est une approche qui reste toutefois intéressante et qui mérite des développements dans le domaine des ouvrages hydrauliques.

Nous pouvons citer par exemple l'utilisation de polymères usagés dans le béton pour la réparation des surfaces hydrauliques des barrages. Dans une étude menée par Alves Galvão et al., (2011), différents matériaux de réparation ont été analysés et fabriqués pour être utilisés sur les surfaces hydrauliques en béton des barrages de centrales hydroélectriques qui ont subi différents types de dommages, tels que l'érosion-abrasion et les attaques chimiques de l'eau du réservoir. Les échantillons de béton ont été fabriqués à partir de matériaux polymères et élastomères provenant de l'industrie du recyclage, tels que le polyéthylène basse densité (LDPE) agglutiné, le polyéthylène téréphtalate (PET) broyé et le caoutchouc de pneus inutilisables. Les teneurs de chaque matériau étaient de 0,5 %, 1,0 %, 2,5 %, 5,0 % et 7,5 % (en poids). Leurs propriétés ont été comparées à celles d'un béton de référence, sans aucun ajout, en comparant la résistance à la compression, la résistance à la traction sous compression diamétrale, la résistance à l'érosion et à l'abrasion sous l'eau, la microstructure et l'application sur le cas d'un barrage existant. Les résultats de l'étude montrent une réduction de la résistance à la compression avec une

augmentation de la teneur en polymères/élastomères. En contrepartie, les résultats montrent que les déchets polymères ajoutés au béton ont donné au matériau une résistance accrue aux tests d'érosion-abrasion sous l'eau, ce qui permet d'envisager une utilisation même dans des zones soumises à des fortes sollicitations par des circulations d'eau (comme la surface d'un évacuateur de crues). L'étude mentionne également que les échantillons de béton étudiés n'ont pas présenté de problèmes techniques lors de leur application comme matériaux de réparation dans la surface de l'évacuateur de crues du barrage étudié.

D. Utilisation de pneus recyclés pour la protection sismique des barrages en remblai :

Gabibov et al., (2023) proposent plusieurs concepts en vue d'utiliser des pneus recyclés pour augmenter la résistance sismique de barrages en remblai. Ces propositions de concept sont présentées simplement par des schémas ou coupes de principe (coupes transversales et longitudinales montrant sommairement la disposition des pneus dans le corps d'un barrage en remblai). Une première approche est basée sur l'isolation sismique du barrage par la mise en place d'une couche de matériaux de faible rigidité dynamique entre le barrage et sa fondation. Dans cette approche, Gabibov et al., (2023) proposent une couche d'isolation comportant des pneus recyclés à bandages métalliques de grand diamètre (poids lourds). Les pneus sont disposés horizontalement en quinconce et leurs cavités sont remplies de gumbrine, un produit résiduaire qui s'accumule dans les décharges de raffineries de pétrole. Une couche de sol compacté est intercalée entre deux couches de pneus jusqu'à que l'ensemble de la couche d'isolation sismique atteigne une épaisseur de l'ordre de 10% à 20% de la hauteur du barrage. Une attention particulière doit être portée à l'étanchéité globale du dispositif et aux effets sur les écoulements au sein du barrage et sa fondation.

Une deuxième approche proposée par Gabibov et al., (2023) consiste à utiliser des pneus recyclés pour constituer des ceintures de renforcement de la résistance sismique de barrages en remblai. Cette approche est envisagée par Gabibov et al., (2023) pour des barrages en remblai zoné avec un noyau argileux et des recharges en matériaux drainants. Les ceintures proposées de renforcement sismique sont constituées de pneus remplis de matériaux granulaires drainants placés en couches horizontales dans les recharges amont ou aval. La ceinture comporte également des éléments tubulaires qui assurent les connexions de renforcement entre les pneus.

Nous n'avons pas connaissance de barrages existants construits avec les approches proposées par Gabibov et al., (2023).

E. Valorisation des sédiments :

La gestion des sédiments constitue une préoccupation majeure dans le domaine des barrages (ICOLD, 2019). L'utilisation des sédiments de barrages est un sujet de recherche et d'exploration dans le domaine de la gestion des ressources en eau et de l'environnement. Les sédiments, qui s'accumulent naturellement dans les barrages au fil du temps, sont souvent considérés comme des déchets (ce qui constitue un fort verrou pour leur réemploi). Cependant, il existe des opportunités pour réutiliser ces sédiments de manière bénéfique. Parmi les pistes d'utilisations potentielles des sédiments de barrages on peut mentionner la restauration de zones humides, la réhabilitation d'habitats aquatiques ou la construction de remblais. On peut citer des exemples de valorisation

de sédiments de barrages dans le domaine de la fertilisation de sols agricoles ou dans la fabrication de matériaux de construction comme les briques (Benkadja et al. 2013) et la pouzzolane artificielle (Laronne, 2000). L'utilisation des sédiments de barrages nécessite une évaluation approfondie des caractéristiques des sédiments, de leur composition et de leur potentiel impact environnemental. Des précautions doivent être prises pour garantir que les matériaux soient appropriés pour l'utilisation envisagée (ce qui peut nécessiter un traitement particulier des sédiments), et que les contaminants éventuels soient traités de manière adéquate. Anger 2014 présente une revue bibliographique de l'utilisation de sédiments de barrages dans différentes filières comme les matériaux cimentaires, les céramiques, les routes et l'agronomie.

VI. CONCLUSION

L'article place les barrages dans un contexte de développement durable en évoquant les principaux aspects positifs et négatifs d'un point de vue social, économique et environnemental. Les barrages contribuent de manière significative au développement de la société en permettant le stockage de l'eau pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, l'hydroélectricité, le soutien d'étiages, les activités touristiques, la navigation et la protection contre les inondations. Le rôle des barrages devient particulièrement important dans un contexte de changements globaux, d'augmentation de demande de ressources en eau et énergétiques ainsi que vis-à-vis du changement climatique.

En contrepartie, les barrages peuvent avoir différents impacts négatifs sur les populations et sur l'environnement. Les barrages doivent ainsi respecter des fortes exigences environnementales afin de minimiser les impacts écologiques et sociaux liés à la construction et l'exploitation de ces ouvrages. Ces exigences passent par une étude approfondie des impacts environnementaux qui conduit ensuite à la mise en place de mesures de mitigation ou de compensation. Ces mesures peuvent porter sur la conservation des habitats naturels (ou compensation des habitats perdus), les passes à poissons, la gestion des sédiments, le maintien d'un débit écologique minimum, la compensation et réinstallation des communautés et la restauration écologique pos-construction entre autres.

Les barrages doivent respecter également des fortes exigences de sécurité afin de minimiser les risques associés à une défaillance de l'ouvrage et d'éviter une rupture de barrage. Les principales exigences de sécurité d'un barrage concernent la sécurité structurale (études de conception/réalisation, justification de stabilité pour différentes situations, vérifications périodiques pendant la vie en service du barrage, ...), la surveillance et entretien (inspection visuelle, dispositif d'auscultation, maintenance/réparation, ...), l'évaluation et gestion des risques.

Ces éléments illustrent le contexte complexe du parc des barrages, confronté à la nécessité et enjeux de prolonger la durée de vie des ouvrages existants tout en répondant aux exigences croissantes en matière de sécurité et de préservation de l'environnement. Dans ce cadre, l'article présente plusieurs solutions utilisées pour le confortement et réhabilitation de barrages en vue d'améliorer les conditions de stabilité et de prolonger la durée de vie en service de barrages (traitement de l'étanchéité, renforcement du drainage, mise en place d'une recharge aval, renforcement par tirants d'ancrages, augmentation de la capacité d'évacuation des crues, ...).

L'article a montré finalement plusieurs opportunités en termes de recherche et de développements techniques autour du recyclage et du réemploi de matériaux pour la construction ou la réhabilitation des ouvrages hydrauliques. Un enjeu majeur correspond à l'utilisation et valorisation des sédiments cumulés dans la retenue de certains barrages (plusieurs pistes d'utilisations potentielles, mais avec plusieurs verrous à lever). Certaines techniques de recyclage/réemploi de matériaux ont déjà fait leur preuve comme par exemple l'utilisation de cendres volantes dans la confection de béton pour la construction ou confortement de barrages en béton compacté au rouleau (BCR). Une piste prometteuse correspond à l'utilisation de graves recyclés de la démolition de bâtiments, par exemple, pour conforter un barrage existant avec la mise en place d'une recharge aval en graves recyclés. D'autres pistes présentées dans cet article méritent des développements complémentaires et/ou d'un retour d'expérience, comme par exemple, l'utilisation de polymères usagés dans la confection de béton pour la réparation de surfaces des barrages.

REFERENCES

Alves Galvão, J.C., Franke Portella, K., Joukoski, A., Mendes, R., Santos Ferreira, E., 2011. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*, Vol.25, n°2, 2011, pp1049-1055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073>

Anger, 2014. Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2014, 304 p.

Benkadja R., Benhadouga M., Benkadja A. (2013). Quantification des matières en suspension et valorisation des sédiments de dragage à l'échelle d'un bassin semi-aride : Cas du barrage du K'sob (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 72, pp 523-531.

CFBR, 2024. Site web du Comité Français des Barrages et Réservoirs (consulté en mars 2024) : <https://www.barrages-cfbr.eu/>

CFBR, 2018. Actes du colloque CFBR « Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues ». Chambéry les 27-28 novembre 2018, 426p. https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/colloque2018_maintenance.pdf

CFBR 2021. Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai – Cadre Général. Edition CFBR, 159 pages. ISBN : 979-10-96371-17-4. https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recueil_confortement_digues_partie_1.pdf

Dégoutte G., et Royet P. (coord), (2003). Sécurité et contrôle des barrages en service. ENGREF, 2003. 325 p. ISBN 978-2-85710-071-3.

Gabibov, F., Shokbarov, Y. M., Gabibova, L., 2023. Use of recycled tires for seismic protection of embankment dams. E3S Web Conf., Volume 371, 2023. *International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East"* (AFE-2022). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102033>

ICOLD, 2024. Site web de la Commission Internationale des Grands Barrages (consulté en mars 2024) : <https://www.icold-cigb.org/>

ICOLD, 2021. *Gestion de la sécurité des barrages : phases de conception, construction et mise en service*. Bulletin 175. International Commission on Large Dams, ICOLD, 2021. 207p.

ICOLD, 2019. *Sediment Management in Reservoirs: National Regulations and Case Studies*. Bulletin 182 (preprint). International Commission on Large Dams, ICOLD, 2019. 192p.

ICOLD, 2012. Position Paper on Dams and the Environment. ICOLD, 2012, 6p. https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/DAMS/Position_paper.pdf

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters.

Laronne J. B., (2000). Sédimentation et barrages : Implications géomorphologiques, économiques et environnementales du comblement des réservoirs. Relation avec les extractions de matériaux fluviaux. *Aménagement et nature*, n°136, pp. 101-111.

MEDAD, 2007. Décret no 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement. Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Journal Officiel de la République Française.

MEDDE, 2015. Décret no 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Journal Officiel de la République Française.