



LES FUITES D'EAU DANS LES BARRAGES DANS LE MONDE : QUELQUES EXEMPLES ALGERIENS

WATER LEAKS IN DAMS IN THE WORLD. SOME ALGERIAN EXAMPLES

BENFETTA H.¹, ACHOUR B.², OUADJA A.³

¹ Université de Mostaganem, Département d'Agronomie,
BP 188/227, Mostaganem 27000, Algérie.

² Laboratoire en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS), Faculté des
Sciences et de Technologie, Université de Biskra,

³ Doctorant - Université de Mascara, Département d'Agronomie,
BP305, Mascara 29000, Algérie

benfettahassen@yahoo.fr

RESUME

La majorité des barrages à travers le monde sont confrontés au problème des fuites d'eau à travers les rives et les fondations. L'étude de ce phénomène s'avère d'une très grande importance, car il peut mettre en danger la stabilité du barrage et réduire sa capacité utile. C'est le cas en particulier des barrages algériens, surtout ceux qui sont implanté en zone aride où la ressource hydrique se fait de plus en plus rare. Dans ce contexte, nous avons vu utile de lancer une étude approfondie traitant ce problème épineux, d'où nous avons bien confirmé que plusieurs barrages sont concernés par le problème des fuites d'eau, dont quinze d'entre eux sont menacés sérieusement du fait que le débit perdu à travers leurs rives et leurs fondations est considérable dépassant un million de m³ par an. Parmi ces barrages, on a constaté aussi que six présentent un débit de perte supérieur à cinq millions de m³ par an chacun. A cet effet, nous allons présenter dans cette étude les barrages algériens les plus menacés par ce phénomène.

Mots clés : Barrages du monde - barrages d'Algérie - fuites d'eau- zones arides.

ABSTRACT

The majority of dams worldwide are confronted with the problem of water leaks through banks and foundations. The study of this phenomenon turns out of a very big importance, because he can put in danger the stability of the dam and reduce his useful capacity. It is the case in particular Algerian dams, especially those who are implanted in dry zone where the water resource becomes increasingly scarce. In this context, we saw useful to throw an in-depth study handling this thorny problem, where from we confirmed well that several dams are concerned by the problem of water leaks, among which fifteen of them are seriously threatened because the flow lost through their banks and their foundations is considerable exceeding a million of m³ a year. Among these dams, we also noticed that six present a flow of loss upper to five millions of m³ a year each. For that purpose, we are going to present in this study the Algerian Dams the most threatened by this phenomenon.

Keywords: Dams of the world - Dams of Algeria – Water Leaks- Dry Zones.

INTRODUCTION

Le phénomène des fuites d'eau au niveau des barrages se traduit par des pertes considérables en eau précieuse et rare et menace sérieusement la stabilité des ouvrages hydrauliques (Therond, 1980). De plus, la plupart des barrages sont sujets à une perte de capacité due essentiellement aux fuites d'eau, à l'envasement des retenues et à l'évaporation intense lorsqu'ils sont implantés dans des régions chaudes (Mesney, 2004).

Le problème des fuites d'eau est très complexe car il menace les quantités d'eau accumulées dans la plupart des barrages à travers le monde et engendre une inquiétude sur la stabilité de ces ouvrages surtout si ce problème persiste. Nous pouvons citer à titre d'exemple le cas des barrages suivants :

- i. Le 2 décembre 1959, le barrage Malpasset fut emporté. La côte de la retenue était voisine de son maximum et une vague s'engouffra dans la vallée, faisant 421 victimes. La cause de l'accident était la présence en aval du barrage d'une faille à pendage amont contre laquelle s'appuyait le rocher de fondation (du gneiss) qui était à cet endroit particulièrement cisailé.
- ii. Le barrage de saint etienne subit de fortes surpressions, notamment en hiver et lorsque la côte du plan d'eau est élevée. Ceci est dû à l'ouverture de fissures au contact béton/rocher provoquée par un basculement

- hydrostatique d'autant plus important que la température est basse (retrait thermique du béton entraînant un déplacement du barrage vers l'aval).
- iii. Lors de sa mise en eau en 1958, le barrage voûte de Cannelles a été le siège d'importantes fuites d'eau à travers la rive gauche et à proximité de la centrale souterraine. Le débit atteignit 1600 l/s pour un plan d'eau dépassant la cote de 75 m. La montée du plan d'eau au-dessus de cette cote provoqua des débourrages importants (Coyne, 1994).
 - iv. L'étude de ce phénomène diffère cependant d'un ouvrage à un autre (Therond, 1980). En Algérie, nous avons recensé quinze barrages dont le volume d'eau exfiltrée dépasse le million de m³ par an chacun. Mieux encore, six de ces barrages présentent un volume de fuite supérieur à 5 millions de m³ (Therond, 1980).

AMPLEUR DES FUTES D'EAU AU NIVEAU DES BARRAGES DANS LE MONDE

Les fuites d'eau au niveau des barrages présentent un problème très sérieux surtout pour les pays à climat sec puisqu'ils menacent les volumes d'eau stockés dans les barrages à travers le monde et peuvent engendrer une déstabilisation de ces ouvrages, si ce problème atteint un certain stade d'évolution (risque de rupture des barrages).

A ce titre, nous allons présenter quelques barrages touchés par le problème des fuites d'eau :

1- Le barrage voûte de CASTILLON est située à l'entrée d'une gorge creusée par l'érosion fluviale dans les calcaires du Jurassique supérieur, construit sur le VERDON, (affluent de la Durance, Alpes du Sud France), il a une hauteur maximale au-dessus de la fondation de 100 m et une capacité de 149 millions de m³, il a été construit en 1948 et la mise en eau était en 1949. La mise en eau partielle en 1948 a été accompagnée de fuites à proximité de l'ouvrage et à travers la rive droite à moyenne distance. L'étanchéité des appuis a été améliorée par un voile d'injection de 46.000 m² (5.000 tonnes de produits secs ont été injectés). La mise en eau, en 1949, ne devait donner lieu à aucune fuite notable (débit maximum enregistré estimé à 100 l/s) (Therond, 1980).

2- Le barrage voûte de la CHAUDANNE est situé à 4 Km à l'aval du barrage de CASTILLON, il a une hauteur de 70 m et une capacité de 16 millions de m³, il prend appui sur les calcaires purs du Jurassique supérieur qui sont entaillés en gorges étroites par le Verdon. La continuité de ces calcaires et leur karsticité les rend suspects sur les deux rives. Des fuites d'eau étaient envisagées compte

tenu de la longueur réduite du cheminement possible et de la fracturation importante des masses calcaires. L'étanchéité des appuis existante a été améliorée par un voile d'injection de 26.000 m², la plupart des accidents ont été colmatés par de l'argile. La mise en eau n'a enregistré aucune fuite (Therond, 1980).

3- Le barrage poids de CAMARASA est situé en Espagne sur la Noguera Pallasera, affluent de SERGE, il a une hauteur de 92 m et une capacité de 157 millions m³. En 1920, la mise en eau partielle de la retenue s'accompagna de pertes d'eau supérieures à 10 m³/s, un voile étanchéité de 1100 m de développement descendant jusqu'au marnes a été réalisé entre 1927 et 1931, il a fallu injecter plus de 190.000 t de produits secs pour réduire les fuites à 80% (Therond, 1980).

4- Le barrage de Saint Etienne de Cantales (FRANCE). Dans un des piézomètres en bordure de la fondation droite de ce barrage, on constatait de fortes surpressions, notamment l'hiver et lorsque la côte était haute. Ceci était dû à l'ouverture de fissures au contact béton/rocher provoquée par un basculement hydrostatique d'autant plus important que la température était basse (retrait thermique du béton entraînant un déplacement du barrage vers l'aval).

Les travaux ont consisté à injecter une résine expansive au moment de l'ouverture maximale des fissures. Les résultats sont une baisse des niveaux piézométriques, ainsi qu'une annulation des débits constatés jusqu'à présent périodiquement en hiver (Therond, 1980).

5- Le barrage voûte de QUINSON de 54.5 m de hauteur est édifié sur le VERDON, affluent rive gauche de la DURANCE –Alpes du Sud-France, il remplace un barrage de 15 m de hauteur construit il y a un siècle. Le VERDON constitue le niveau de restitution des écoulements souterrains. Très en amont, dans la retenue, quelques sources karstiques à faible débit sont connues. Malgré l'absence d'un voile étanchéité, la mise en eau du barrage actuel n'avait été accompagnée d'aucune fuite au rocher (Therond, 1980).

6- Le barrage voûte de SAINTE-CROIX est situé sur le VERDON (Alpes du Sud-France), il a une capacité de 767 millions de m³ et une hauteur de 95 m. Le site du barrage est situé 600 m à l'aval de l'entrée d'une gorge creusée dans un anticlinal calcaire, traverse au VERDON. Cet anticlinal dissymétrique plonge rapidement à l'amont, il ferme une vaste plaine creusée dans des marnes et des conglomérats. C'est dans cette plaine que se développera la majeure partie de la retenue. Les eaux de la retenue mouilleront, à l'amont immédiat de l'ouvrage, les parois calcaires du Canyon et sur les deux rives, la retombée amont de

l'anticlinal. Plus à l'amont en rive gauche, les eaux mouilleront d'autres structures calcaires, dégagées de leur couverture marneuse et parallèles à l'anticlinal de BAUDINARD. Les résultats de la mise en eau partielle dans ce barrage conduisent à envisager des débits de fuite voisins de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, ces fuites pourraient ressortir soit à proximité de l'ouvrage (250 m) soit au niveau des sources qui se trouvent à l'exutoire (Therond, 1980).

7- Le barrage voûte de CANELLES est construit sur la NOGUERA RIBAGORZANA, affluent de l'ERBE (Espagne), il a une capacité utile de 543 millions de m^3 et une hauteur de 148 m .Il est situé à la sortie d'une gorge creusée par la rivière dans une série calcaires traverses à la vallée. Lors de la mise en eau en 1958, des fuites importantes ont été observées en rive gauche à proximité de la centrale souterraine. Le débit atteignit 1600 l/s pour un plan d'eau à + 75 m. La montée du plan d'eau au-dessus de cette côte provoqua des débourrages importants. Pour la côte + 85 m, les débits de fuites atteignirent $8 \text{ m}^3/\text{s}$, interdisant la poursuite du remplissage. L'importance de ces fuites devait motiver des travaux d'étanchement considérables (Therond, 1980).

8- Le barrage poids de BOUVANTE est situé sur la Lyonne au cœur du massif montagneux de Vercos (Alpes Française du Nord). La mise en eau en 1926 s'accompagna de fuites d'eau de l'ordre de 1100 l/s, les eaux infiltrées dans les calcaires Urgoniens et crétacés rejoignaient la source des FREYDIERES. Les traitements réalisés entre 1927 et 1958 ont permis de réduire les fuites à moins de 300 l/s (Therond, 1980).

9- Le barrage voûte de MONTEJAQUE édifié sur le RIO GADUARES (Espagne du Sud) à l'aval d'une vallée karstique dont l'exutoire naturel est une rivière souterraine, il a un volume utile de 34 millions de m^3 et une hauteur de 73.5 m. La mise en eau de la retenue a donné des fuites importantes qui ont atteint $4 \text{ m}^3/\text{s}$ pour $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ d'apport interannuel moyen au barrage. Les infiltrations se faisaient par des fissures (diaclases) et par des puits absorbants incomplètement bouchés par des colmatages peu résistants. La majeure partie des eaux infiltrées réapparaissait dans la rivière souterraine. Les travaux d'étanchement (colmatage de surface) n'ont pas permis de réduire suffisamment les fuites pour permettre une exploitation économique de la retenue (Therond, 1980).

10- Le barrage en enrochement de GREOUX est situé sur le VERDON, affluent de la DURANCE (Alpes du Sud-France), il est construit dans une gorge creusée dans les calcaires tabulaire du CRETACE inférieur, ces calcaires bien stratifiés, épais de 150 m environ, présentent une altération caractéristique qui souligne les épontes des cassures.

Il a une capacité de 80 millions de m³ et une hauteur de 64 m. Des fuites par des cheminements courts pouvaient être envisagée sur les deux rives à travers les calcaires karstiques du Crétacé ; l'hypothèse de circulations à grande distance à partir des calcaires jurassiques pouvait également être faite. L'étanchéité de la roche existante a été améliorée par un voile d'injection qui sous le barrage atteint les marnes et se poursuit sur 150 m environ dans chaque rive, les consommations de coulis ont été faibles au-delà des 20 premiers mètres de profondeur. La mise en eau en 1967 n'a provoqué aucune fuite notable (quelques litres / seconde dans les galeries de drainage) (Therond, 1980).

11- Le barrage poids de GENISSIAT est édifié sur le RHONE (France), il est construit dans une gorge creusée dans les calcaires massifs très peu fissurés de l'Urgonien. Les eaux de la retenue mouillent ces mêmes calcaires sur une très grande surface. Un voile d'injection, d'extension réduite, a été réalisé avec des consommations très faibles (30 à 50 kg de produits secs par mètre de forage) confirmant la faible fissuration du rocher. La mise en eau n'a été accompagnée d'aucune fuite (Therond, 1980).

12- Le barrage poids de CHARMINNE-MOUX réalisé entre 1947 et 1950 est situé sur l'OIGNIN, affluent de l'AIN, dans le JURA Français. Il a une capacité de 5 millions de m³ et une hauteur de 18 m. Dans la région, de nombreux réseaux karstiques de grande taille ont été découverts entraînant des fuites importantes. Les travaux étanchéité ont été réalisés à partir d'un sondage en liaison directe avec le réseau karstique. Par ce sondage, plusieurs milliers de tonnes de matériaux à forte granulométrie ont pu être injectés. Parallèlement, sur les affleurements calcaires, des traitements de surface ont été réalisés par injection sur plus de 3.000 m². Finalement, en Novembre 1950 la mise en eau totale n'a été accompagnée d'aucune fuite notable, mettant ainsi en évidence l'efficacité du traitement effectué [1].

13- Les barrages de CEYRAC sur le RIEUMASSEL, affluent du VIDOURLE, et de CONQUEYRAC sur le VIDOURLE sont des ouvrages destinés à éviter les crues catastrophiques du VIDOURLE qui est une des principales rivières des causses Nord - Montpelliérains. Situées à quelques Kilomètres l'une de l'autre, ces retenues se développent dans le même cadre géologique et hydrogéologique qui est celui du bassin d'alimentation de la grande source karstique de SAUVE, située à quelques kilomètres à l'aval. Cette source est l'une des cinq plus importantes sources des causses Nord - Montpelliérains. A l'amont de cette source, le VIDOURLE ET LE RIEUMASSEL n'est pas des rivières pérennes (Therond, 1980).

14- Le barrage poids de CEYRAC, affluent rive droite du VIDOURLE, est construit sur le RIEUMASSEL Il prend appui sur le sommet des calcaires du JURASSIQUE supérieur (PORTLANDIENN). A l'aval, la rivière coule dans une gorge sinueuse creusée dans les calcaires et les marno-calcaires du crétacé inférieur. Il a une capacité de 7 millions de m³ et une hauteur de 20 m, avec une longueur en crête de 390 m. A la hauteur de l'ouvrage, la nappe de fissures est située à 30 m au-dessous du lit de la rivière. Sauf en période de crue, les eaux du RIEUMASSEL disparaissent avant d'atteindre la retenue pour rejoindre la source de SAUVE, la vitesse des circulations souterraines est de 450 m/h environ (Therond, 1980).

15- Le barrage de CONQUEYRAC prend appui sur les calcaires karstiques du Portlandien (Jurassique supérieur). A l'aval, la rivière coule dans une gorge très sinueuse creusée dans le Portlandien. A l'amont immédiat de l'ouvrage, la retenue se développe sur les derniers affleurements de calcaires Jurassiques puis sur les calcaires et les marno-calcaires du crétacé inférieur. Il a une longueur en crête de 570m et une hauteur de 17 m. En période de pluie, le niveau remonte jusqu'à la surface et durant les périodes de sécheresse, les eaux de VIDOURLE se perdent en queue de retenue pour rejoindre la source de SAUVE par les réseaux karstiques. Le niveau des écoulements souterrains se situe à quelques mètres au-dessous du niveau du bed-rock (Therond, 1980).

16- Le barrage voûte de VOUGLANS est situé sur l'AIN (JURA Français), construit à la sortie aval d'une gorge sinueuse creusée dans une puissante série horizontale, de calcaires et dolomies d'âge jurassique. Il a une capacité de 600 millions de m³ et une hauteur de 130 m. Le voile d'injection du barrage a une extension réduite, les absorptions ont été inférieures à 105 kg par mètre linéaire de forage, ce qui confirme la faible fissuration du terrain. En rive droite, l'existence du réseau actif de la CABORNE présentait un risque de fuite important en réduisant considérablement la longueur des lignes de fuites. En rive gauche, la nature des terrains ne permettait pas d'éliminer tout risque de fuite, malgré la présence de placages morainiques étanches masquant en partie les calcaires dans la cuvette. La mise en eau en 1968-1969 n'a pas donné lieu à des fuites importantes. On peut évaluer à 300 l/s l'augmentation maximale du débit aux sources de la PORCHERIE. En rive gauche, aucune résurgence n'a été signalée (Therond, 1980).

17- Le barrage à noyau de GAUTING de hauteur 50 m situé en BEIJING en république populaire de chine a été fondé sur des calcaires et de la dolomie. Dès sa première mise en eau en 1955, les fuites ont atteint 1 m³/s. Les traitements effectués ont réduit les fuites jusqu'à 0.1 m³/s (Therond, 1980).

18- Le barrage d'ANDI de hauteur 29.8 m est situé en province de SHANDONG en république populaire de chine, le débit de fuites à travers la rive droite est de l'ordre de 0.6 m³/s. Les traitements effectués ont réduit les fuites à moins de 0.08 m³/s (Therond, 1980).

19- Le barrage voûte de WUJIANGDU de la province de GUIZHEOU en république populaire de Chine est situé dans la roche de Yulongshon, il a une hauteur de 165 m et une épaisseur de 230 m. Les fuites à travers sa fondation sont de l'ordre de 10 m³ / jour depuis sa construction (Therond, 1980).

20- Le barrage en enrochements du NEBAANA de TUNISIE est édifié sur l'oued NEBAANA, il a une capacité de 86 millions de m³ et une hauteur de 62.5 m. En 1965, la mise en eau partielle de la retenue s'accompagna de pertes d'eau dans l'oued OHEICHE en rive droite qui ont atteint 10 l/s environ ; pour ces circulations d'eau, le rôle joué par les diaclases à remplissage de calcite était évident. En rive gauche, le débit de fuites augmentait à quelques dizaines de litres /seconde. Les traitements de surface réalisés en rive droite ont permis de réduire les fuites sur cette rive (Therond, 1980).

21-Le barrage en enrochements de KAROUN est construit sur le LITANI qui est la principale rivière du LIBAN. Il a une hauteur de 60 m et une capacité de 220 millions de m³. La retenue se développe sur des formations diverses (calcaires, dolomies, marnes, marno-calcaires) plus anciennes que les calcaires karstiques. La mise en eau s'est achevée en 1967. Le débit de fuites a été estimé à 300 l/s m³ (Therond, 1980).

22- Le barrage SADDAM (Saddam dam) est un très grand barrage en Irak sur le Tigre, à 80 km, en amont de Mossoul. C'est un barrage en terre avec noyau d'étanchéité en limon argileux, il est construit sur du gypse, roche soluble dans l'eau. Il a une capacité de 11 milliards m³ et une hauteur de 120 m. Dès sa première mise en eau en 1986 et malgré le voile d'injection, des fuites importantes sont apparues :le barrage perd jusqu'à 1.4 m³/s, soit 80 t de fondation par jour sous forme de gypse dissous. Les injections pratiquées pour essayer de lutter contre le grignotage des fondations ont été arrêtées en 1991 à cause des évènements. Ce barrage est donc en danger de rupture brutale, par un phénomène de renard. Cela se traduirait par une vague qui dévasterait la riche plaine agricole du tigre et atteindrait en 3 ou 4 heures la ville de Mossoul avec une hauteur d'eau de 10 à 20 m. et des risques de pertes humaines importantes. Compte tenu de la situation de l'Irak, l'état du barrage n'a pu que se dégrader. Il est urgent d'envoyer une mission d'expertise pour contrôler l'ouvrage et proposer éventuellement des remèdes. Ce pourrait être la réalisation d'une paroi moulée de 120 m. de profondeur jusqu'au plancher calcaire (Therond, 1980).

23- Le barrage poids du LAC LONG construit entre 1915 et 1919 est situé dans la région de NICE, fait partie de l'aménagement hydroélectrique des MESCE qui turbine les eaux des bassins versants des torrents Inferno et Casterino. C'est un ouvrage poids en pierres sèches, sinueux en plan, d'un volume de 12.000 m³. Il a une hauteur maximale au-dessus des fondations de 15 m et il crée une retenue de 1220.000 m³ de capacité utile et il a une hauteur maximale au-dessus des fondations de 15 m. Cet aménagement comprend sept lacs naturels situés dans des cuvettes glaciaires. Il se trouve en zone montagneuse, à l'intérieur du périmètre du Parc National du Mercantour à des altitudes comprises entre 2100 et 2345 m. Son rôle est de réguler les apports des eaux de fonte des neiges et des pluies d'automne. Le parement amont est en maçonnerie hourdée de ciment sur une épaisseur de 1.20 m avec un revêtement en moellons assisés et jointoyés entre eux. Le parement aval à un revêtement analogue en moellons sur le lit de béton et de mortier. L'étanchéité est réalisée sur le parement amont par une maçonnerie au mortier de ciment d'une épaisseur de 1.20 m. Depuis la fin des années 1970, le débit de fuite mesuré à l'aval de l'ouvrage a augmenté pour finalement se stabiliser vers 1992 sur des valeurs très fortes (plusieurs centaines de litres par seconde). Même si le débit semble être stabilisé, le niveau de fuite reste inacceptable. C'est pourquoi en 1994, EDF a souhaité établir une expertise du parement amont et du contact fondation-parement amont. Pour une partie, les fuites doivent s'expliquer par le mauvais état de la maçonnerie du parement amont. Ce dernier, depuis 1978, n'a été traité que partiellement. L'observation rapide des joints au mortier suffit pour constater qu'ils sont fortement dégradés. Néanmoins, le niveau de fuite de l'ouvrage pourrait ne pas être causé que par la seule dégradation du parement amont. En 1978 et 1991, la fondation de l'ouvrage a fait l'objet d'auscultations géophysiques qui ont permis de reconnaître des placages morainiques ou colluviaux recouvrant sur une épaisseur maximale de 7 mètres un substratum de bonne qualité et très peu perméable. Les fuites de l'ouvrage, pour une autre partie, pourraient être causées par l'éventuelle présence de niveaux graveleux très perméables et érodables situés dans ces placages, sous la parafouille du parement amont. En 1994, il a donc fallu lever cette incertitude, en ayant recours à une méthode géophysique permettant de déceler l'origine des fuites aussi bien dans le parement amont qu'au contact fondation parement. Cette méthode devait être aussi capable de renseigner dans une certaine mesure sur l'importance relative des fuites, entre la fondation et le parement amont. Le choix s'est porté sur une méthode d'application : la méthode dite d'électrofiltration. Pour traiter ces fuites, deux méthodes ont été proposées, celle des injections ou la création d'une parafouille en béton (Coyne, 1994).

24- Le barrage de CHILATAN est situé au Mexique (état du Michoacan-Tepalcatepec), il a une hauteur de 105 m et une longueur de 1 100 m avec une digue en enrochement et un noyau en argile. La partie droite du barrage est assise sur une couche de congglomérats (grès, blocs, graviers volcaniques cimentés par un matériau sableux- couches très hétérogènes). Ensuite l'on trouve un granit altéré puis un granit sain. Pour les nécessités de la construction dans cette rive droite, il a été exécuté une galerie dans l'axe longitudinale, prolongé par une galerie transversale, débouchant à l'aval. Cette galerie a été revêtue d'une couche de 25 cm de béton (non armé), mais avec des vides importants entre le béton et la roche. Cette galerie a servi pour exécuter une partie du voile d'injection. Les reconnaissances (essais d'eau) n'ayant pas mis en évidence une forte perméabilité du congglomérat, le traitement a été succinct, ainsi que les injections de collage de la galerie. De plus cette galerie a été utilisée comme galerie de drainage. Dès la mise en eau, il est apparu une fissure importante du béton de revêtement, ainsi qu'une fuite avec entraînement d'éléments fins, et qui s'amplifiait avec la montée de la retenue (Plus de 700 m³/h). L'objectif des travaux était d'arrêter la forte venue d'eau par des injections du rocher depuis la galerie et de combler les vides existants, par injection, entre le revêtement de la galerie et le rocher. La perforation sous fortes arrivées d'eau est très difficile, et les forages s'éboulent en cours d'avancement. Il est très difficile d'imprégner des sols fins, tels que les congglomérats, d'où l'utilisation de ciments fins. Les fortes infiltrations (débits et pressions), à travers le congglomérat rendaient pratiquement impossible la mise en place de coulis, qui étaient entraînés au fur et à mesure de l'injection. De plus l'état de la galerie (fissurée et non armée), rendait impossible l'injection à forte pression "trop dangereux" (Quantité des travaux : perforation 2250ml, reperforation 1500ml, injection de ciment : 210 tonnes, injections de ciment fins : 130 tonnes). Pour ces raisons il a fallu abandonner les travaux et chercher une autre solution (Jean, 1991).

25- Le barrage de SAYANO (SIBERIE OCCIDENTALE « près frontière Mongolie ») est un gigantesque barrage en béton de 240 m de haut, de 25 m en tête et 110 m en pied, a une longueur de 350 m en pied et de 1000 m en couronnement. Le niveau de la retenue varie de 40 m en fonction des saisons. Ces variations provoquent des fissures dans le béton et dans l'assise rocheuse de la fondation (schiste dur). Dans une première étape, les zones de fissures les plus importantes du béton ont été injectées à haute pression avec de la résine. Globalement les résultats ont été satisfaisants. Par la suite il a été décidé de réaliser un plot d'essai pour vérifier si la méthode appliquée aux fissures du béton pouvait être utilisée pour la fondation rocheuse du barrage. A l'intérieur de

la galerie basse du barrage (≈ 200 m sous le niveau d'eau de la retenue), une zone de 60 m de longueur a été divisée en 5 parties, les 3 parties centrales devant être traitées, les 2 parties latérales servant pour mesurer l'influence du traitement en profondeur. Toute la zone a été équipée d'extensomètres 4430X-GEOKON placées dans des forages à 3 différents niveaux. L'ensemble de ces extensomètres étant relié à un ordinateur, effectuant les calculs de déformations en temps réel. D'autre part l'ensemble du barrage est équipé d'une grande quantité d'appareil permettant un large suivi des déformations. En effet l'injection à de hautes pressions (≈ 400 kg/cm²) peut provoquer des incidents importants dans le barrage, d'où toute l'importance des mesures. Le but étant d'exécuter un voile étanche d'environ 600 m², sous les 4 mètres d'épaisseur du béton de radier de la galerie, et de réduire ainsi de 50 % le débit des drains aval correspondant à la zone. Le traitement devait se faire par petites tranches descendantes de 5 mètres d'épaisseur) et petites zones, à partir de 3 lignes longitudinales. La méthode utilisée pour l'injection de résine ne permettant pas de reperforer dans les mêmes trous, à chaque passe descendante il fallait refaire de nouveaux forages carottés. Un essai d'eau (type Lugeon) était effectué chaque 1.50 m de perforation, ce qui permettait en cours de reperforation d'un niveau déjà traité d'observer la variation de perméabilité. D'autre part visuellement l'on pouvait observer sur les carottes le remplissage par la résine des fissures du rocher. Enfin en cours d'injection l'on notait la variation du débit des drains aval du barrage. Cette technique très particulière, petite quantité d'un produit extrêmement visqueux à faible débit (90 l/h) et à très haute pression (400 à 600 kg/cm²), ne peut être exécuté que par des spécialistes. Mélange: 3 composants de résine BEPOX (Espagne) par petites quantités, puis pompée à faible débit à travers un obturateur simple de conception Rodio Madrid, pouvant résister à de très fortes pressions. Une fois la quantité prévue injectée une vanne placée sur la conduite est fermée jusqu'à prise du coulis. L'obturateur étant perdu dans le sol. « Consommation moyenne: 3.90 l de résine par m³ de terrain (Résine injectée 17 tonne) » (Jean, 1991).

26- Le barrage de MALPASSET en voûte mince était un barrage classique d'une longueur en crête de 222 mètres et d'une hauteur de 66 mètres. Ces deux parements étaient à double courbure et la rive gauche s'appuyait sur une culée poids. Lors des injections du voile étanche, on avait constaté que les absorptions étaient minimales, signe que la roche de fondation était d'une faible perméabilité. Sa construction fut achevée en 1954. Le 2 décembre 1959, vers 21 heures, le barrage fut emporté. La côte de la retenue était voisine de son maximum: une vague s'engouffra dans la vallée, faisant 421 victimes (Photo I.1, tableau I.2). La cause de l'accident était la présence en aval du barrage d'une faille à pendage

amont contre laquelle s'appuyait le rocher de fondation (du gneiss) qui était à cet endroit particulièrement cisailé. Le barrage aurait dû stabiliser cette situation. Cependant, la pression hydrostatique, s'appliquant sur de grandes surfaces a pu atteindre des valeurs considérables, faisant littéralement exploser les berges et les fondations. L'analyse de l'accident par Roubault, conclut que, par soucis d'économie, l'étude géologique n'a pas été faite à l'endroit où fut implanté le barrage. En plus de cela, une auscultation très réduite (légalisation inadaptée à l'époque) n'a pas permis d'observer les critères annonciateurs d'une catastrophe (Frank ; 2002).

27- Dans le Corps du barrage de COMBES situé en FRANCE, il a été constaté l'augmentation constante des niveaux piézométriques. Les travaux d'étanchement du parement amont qui ont été réalisés ont permis de réduire les pertes d'eau (EDF 2002).

28- Le barrage de VIEUX PRE (VOSGES) est situé près du village de celles-s-plaine (Raon-L'Etape-france), il a été construit entre 1981 et 1985 et mis en service en 1993. Les caractéristiques de ce barrage sont résumées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Caractéristiques du Barrage VIEUX PRE (VOSGES) (DRIRE ,2001).

Hauteur sur TN : 70,00 m	Hauteur sur fondations : 80,00 m
Longueur en crête : 330,00 m	Altitude de la crête : 388,30 NGF
Altitude de la RN : 386,00 NGF	Altitude des PHE : 386,70 NGF
Epaisseur en crête : 8,00 m	Epaisseur en pied : 355,00 m
Fruit amont : 2,5 à 3	Fruit aval : 1,7 à 2
Volume du barrage : 1 800 000 m ³	Surface de la retenue (à RN) : 3,02 km ²
Surface du bassin versant : 11,00 km ²	Débit de prise : 13 m ³ /s
Volume de la retenue (à RN) : 61,60 hm ³	Débit de vidange : 43 m ³ /s
Débit d'évacuation des crues : 6 m ³ /s	Vidange : vanne wagon de garde suivie d'une vanne de réglage à glissières
Evacuation des crues : déversoir en tulipe sur un puits vertical de 63 m de hauteur raccordé à une galerie	

29-Le barrage VIEUX PRE (VOSGES) est zoné avec noyau fin en argile, il est fondé sur des grès vosgien affectés par des fractures ouvertes, d'extension verticale très limitée (dont l'origine est liée au fossé Rhéna), contre lesquels on a procédé à un traitement d'étanchéité systématique. On a affaire à des dépôts lenticulaires dont la longueur varie du mètre à l'hectomètre. La géologie est donc très incertaine (difficultés accrues par couvert végétal). Les levés géologiques ont permis de déterminer plusieurs conséquences préjudiciables:

- les levés de fracturation ne sont pas extrapolables au-delà de quelques mètres.

- on observe de nombreuses diaclases ouvertes dont le comportement hydraulique est voisin de celui d'un conduit karstique (érosion latérale et débouillage de failles à prévoir)
- l'extension verticale de ces conduits rend toute exploration classique extrêmement difficile.

Les reconnaissances se sont étalées sur toutes les étapes de la construction: lors de la phase d'étude (sondages carottés, galeries de reconnaissances, essais de type lugeon (Sébastien Kieffer) et piézométrie ont permis de déceler une hydrogéologie complexe), lors de la construction (sondages horizontaux ou peu inclinés avec essais d'eau spéciaux ont permis de constater de forts débits potentiels : 300 à 800 l/min), lors du remplissage (télé-détection thermique qui a démontré l'hétérogénéité du massif au niveau des perméabilités et l'existence de conduits privilégiés). Le traitement de la fondation se résume à un traitement de peau et à un traitement profond. Le traitement de peau a lieu lors de la construction du barrage et consiste, d'une part en un curage des fractures puis à un remplissage au béton (les lentilles de sables sont traitées au gel dur de silicate dont la granulométrie est inférieure à celle du ciment) et d'autre part en une injection de peau réalisée au droit du futur noyau. Le traitement profond consistait en un voile d'étanchéité. Par soucis d'économie, le voile a été réalisé en plusieurs étapes: EDF a d'abord procédé à une mise en eau progressive pour évaluer ainsi la teneur des fuites dans l'ensemble de la cuvette. Celles-ci étant jugées acceptables, on a installé un premier voile s'intéressant aux abords immédiats de la digue, suivi deux ans plus tard d'un second s'étalant jusqu'à 250 mètres en rive gauche, 70 mètres en rive droite et jusqu'à une profondeur de 50 mètres. Le voile est trilineaire à l'exception d'une zone renforcée pentalinéaire à proximité du remblai où des venues d'eau étaient apparues. Les gradients hydrauliques sont ainsi diminués, notamment au contact de la digue. On procède ainsi à un serrage progressif: mise en place des voiles amont et aval puis remplissage du voile central par une coulisse bentonite ciment (Christophe La pierre). Le ciment est amélioré avec des additifs: un dispersant anionique et un dispersant tensioactif qui permettent respectivement de défloculer l'argile de la boue bentonitique (Christophe La pierre), de diminuer la viscosité et de favoriser la résistance à l'essorage du coulis. Après les traitements de la fondation, les débits de drainage en rive gauche qui étaient de 5.5 l/s en 1987 (avant le traitement) ont diminué jusqu'à 3.1 l/s en 1988 et en rive droite de 3.5 l/s à 2.8 l/s. Il faut préciser qu'un voile de drainage a été étendu parallèlement à ce voile d'étanchéité et peut prendre le relais en cas de défaillance du rideau d'injection qui pourrait conduire à une augmentation locale de la pression hydrostatique pouvant elle-même induire un débouillage dans les appuis, préjudiciable à la stabilité de la digue (DRIRE ,2001).

Au regard des barrages et lacs fortement sujets à ce phénomène, nous citons ceux de Magaca et Sabaneta en république Dominicaine, Contreras et Cannelles (un débit de fuites de l'ordre de 250 l/s est enregistré) en Espagne, le lac Laja et Colbun au Chili, Tominé au Colombie ainsi que le plus grand lac artificiel du monde Volta sis au Ghana (ANBT, 2003).

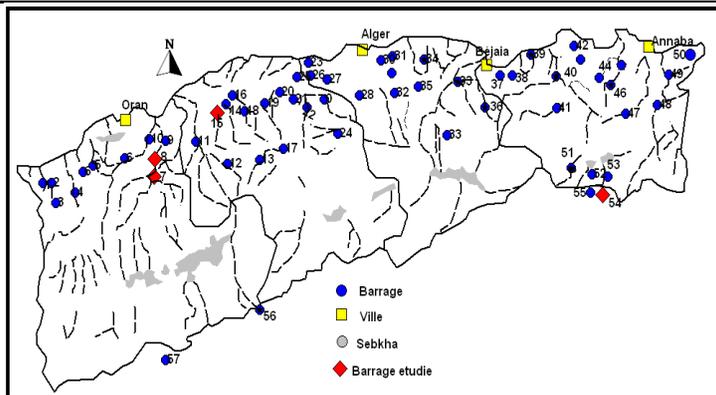
AMPLEUR DES FUITES D'EAU DANS LES BARRAGES ALGERIENS

Suite à une étude approfondie et l'examen des dossiers techniques et de la documentation au niveau de l'agence nationale des barrages-Algérie, nous avons remarqué que plusieurs barrages sont concernés par le problème des fuites d'eau dont quinze d'entre eux sont menacés sérieusement du fait que le débit perdu à travers leurs rives et leurs fondations est considérable dépassant un million de m³ par an. Parmi ces barrages, on a constaté aussi que six présentent un débit de perte supérieur à cinq millions de m³ par an chacun. Le tableau 3 présente les barrages Algériens fortement menacés par ce phénomène (Figure 1) (ANBT, 2003).

Tableau 2 : Liste des barrages en Algérie.

N ^o	Barrage	Date de la mise en eau	Capacité initiale (Mm ³)	Barrage	Date de la mise en eau	Capacité initiale (Mm ³)
1	Souani	2005	47	Keddara	1985	145
2	Boughrara	1999	175	Béni Amrane	1988	16
3	Béni Bahdels	1952	63	Lekhal	1985	30
4	Mefrouch	1963	15	Ksob	1977	30
5	Sidi Abdeli	1988	110	Tisedit	2205	167
6	Sarno	1954	22	Taksebt	2001	175
7	Ouizert	1986	100	Ain Zada	1986	125
8	Bouhanifia	1948	73	Ighil Emda	1953	155
9	Fergoug	1970	18	Erraguene	1961	200
10	Cheurfas II	1992	82	El Agrem	2002	34
11	SM Benaouda	1978	235	Béni Hroun	2004	960
12	Bakhada	1963	56	H.Grouz	1987	45
13	Dahmouni	1987	41	Béni Zid	1993	40
14	Merdja	1984	55	Guenitra	1984	125
15	Gargar	1988	450	Zardezaz	1977	27
16	Sidi Yakoub	1985	280	Zit Emba	2001	117
17	Bouguera	1989	13	H. Dzbagh	1987	200
18	Kouidat Rasfa	2004	75	Oued Cherf	1995	157
19	Oued Fodda	1932	228	Ain Dalia	1987	82

20	Oued Mellouk	2004	127	Chafia	1965	171
21	Harreza	1984	70	Mexa	1998	47
22	Deurdeur	1984	115	K. Medaouar	2004	69
23	Ghrib	1939	280	F. El Gueiss	1939	3
24	Boughezoul	1934	55	Babar	1995	41
25	Boukourdane	1992	97	Foum Gherza	1950	47
26	Meurad	1860	1	F. Gazelles	2000	55
27	Bouroumi	1985	188	Brezena	2000	122
28	Ladrat	1989	10	Djorf Torba	1969	350
29	Hamiz	1935	21			



Source : Agence Nationale des Barrages et des Transferts –Alger (ANBT).

Figure 1 : Localisation des barrages Algériens.

Tableau 3 : Les barrages Algériens confrontés sérieusement au problème des fuites d'eau (ANBT, 2003 ; Benfetta 2009).

N°	ANNEE	NOM DU BARRAGE	VOLUME PERDU (10 ⁶ m ³)
1	1980/1981	FoumelGherza	20.7
2	1990/1991	Ain Dalia t	7.00
3	1990/1991	Djorf-Torba	20.891
4	1993/1994	Sidi Abdelli	1.09
5	1993/1994	Ghrib	3.69
6	1994/1995	K'sob	3.237
7	1995/1996	Mardja sisi Abed	1.219
8	1995/1996	Beni bahdal	1.289
9	1995/1996	Ouizert *	23.34
10	1996/1997	Bouhanifia	1.098
11	1997/1998	Cheurfas II	3.237
12	1997/1998	Gargar	31.705
13	2001/2002	Hammam Debagh	1.126
14	2001/2002	Zerdezas	1.546
15	2001/2002	Cheffia	5.250

Source : Agence Nationale des Barrages et des Transferts –Alger (ANBT).

D'après le tableau 3, on remarque que le volume des fuites d'eau varie d'un barrage à un autre selon les conditions naturelles et la situation géographique de chaque site (Figure 2, Figure 3) (ANBT, 2003 ; Royet 2002).

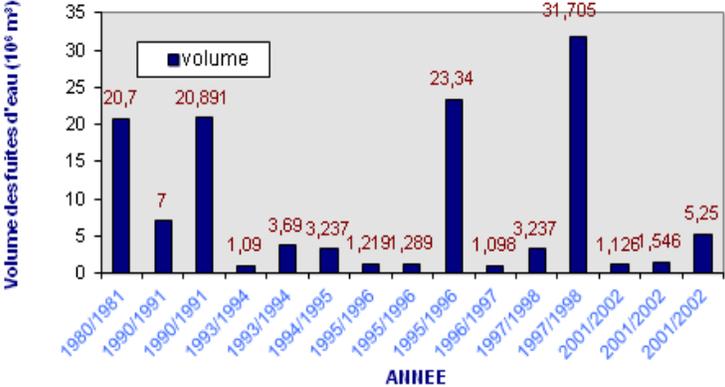


Figure 2 : Variation du volume des fuites en fonction du temps dans les barrages Algériens

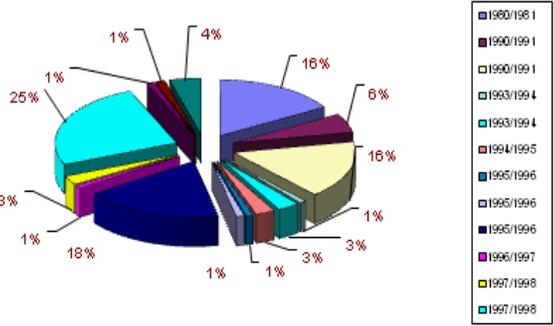


Figure 3 : Présentation du volume des fuites d'eau des barrages Algériens par secteurs

La représentation graphique par les figures (2 et 3) illustre bien la variation des débits de fuites pour les barrages concernés par ce phénomène durant la dernière décennie.

D'une manière générale, nous constatons que le volume d'eau perdu par fuites dans les barrages Algériens est important surtout pour les barrages de Gargar, Ouizert, Foume el Gherza et Djorf Torba dont les pertes d'eau sont très considérables et présentent des menaces très sérieuses pour la stabilité de ces ouvrages hydrauliques.

A cet effet, nous allons représenter graphiquement la variation des débits de fuites en fonction du temps pour ces barrages qui se trouvent confronter sérieusement au problème des fuites d'eau dans les figures (4 à 19) (ANBT, 2003 ; Benfetta 2009).

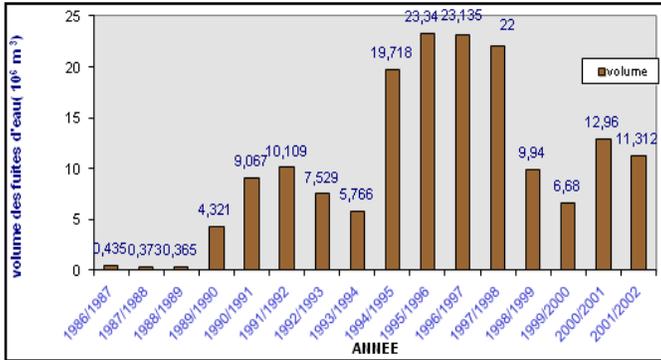


Figure 4 : Variation du volume des fuites d'eau en fonction du temps - barrage de Ouizert

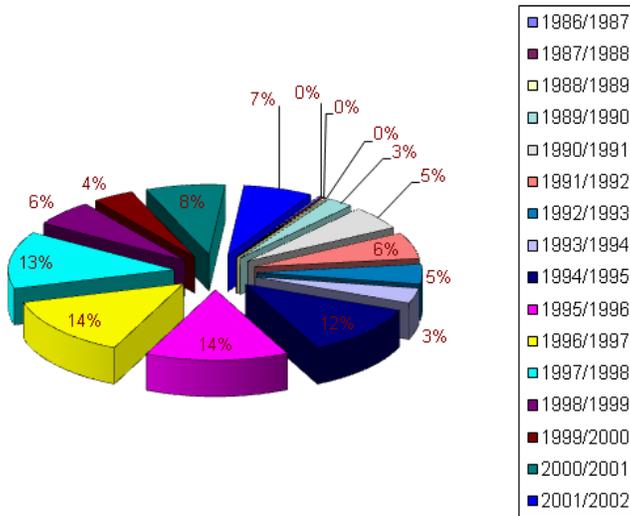


Figure 5 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs - barrage de Ouizert

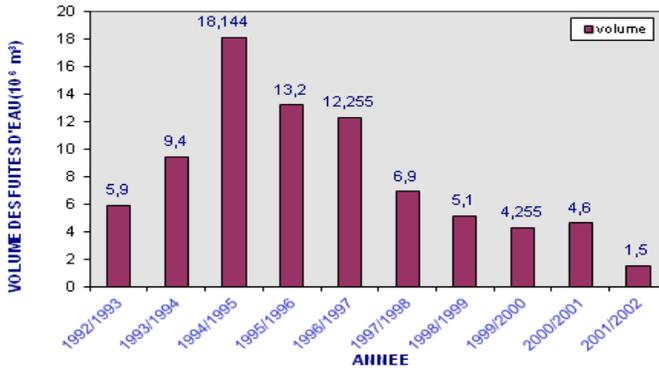


Figure 6 : Variation du volume des fuites d'eau dans le temps-barrage de Djorf-Torba

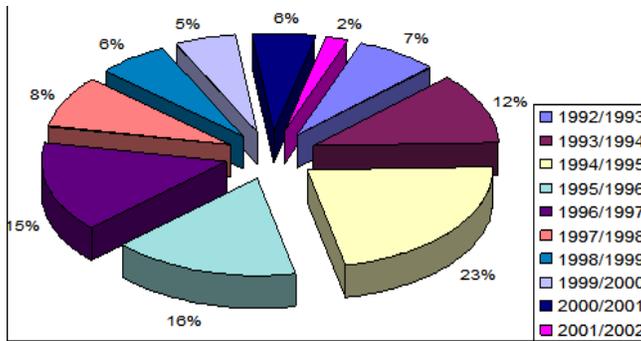


Figure 7 : Présentation du volume de fuites d'eau par secteurs -Barrage Djorf Torba

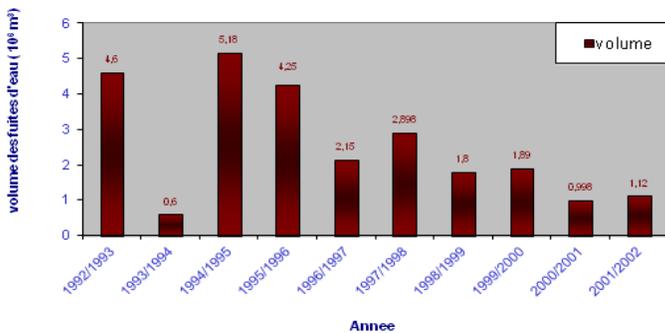


Figure 8 : Variation du volume des fuites d'eau dans le temps-barrage de Foum el Gherza

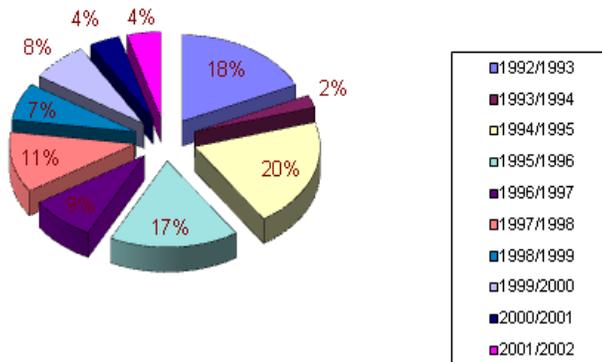


Figure 9 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs - barrage de Foum el Gherza

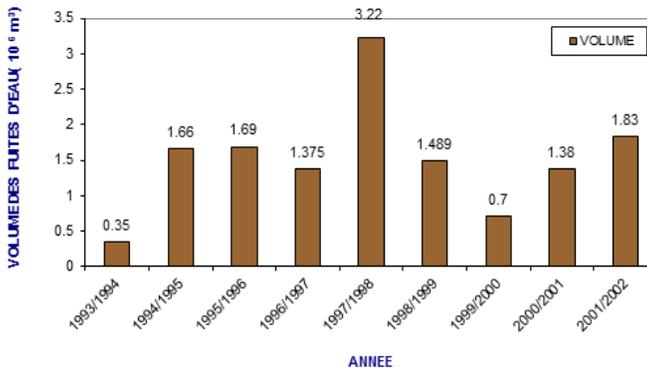


Figure 10 : Variation du volume des fuites d'eau dans le temps-barrage de Cheurfas II

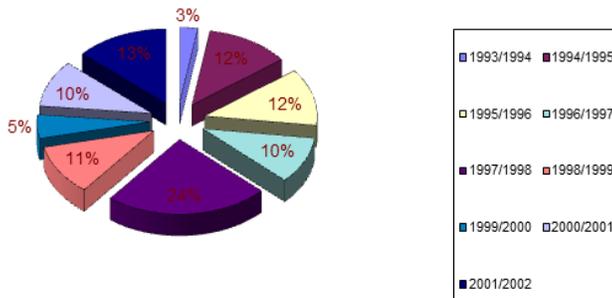


Figure 11 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs- barrage Cheurfas II.

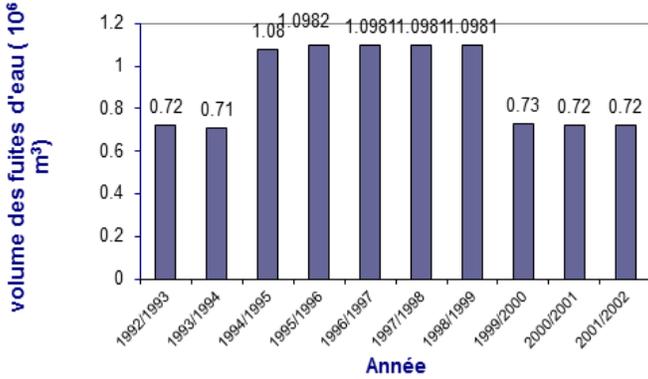


Figure 12 : Variation du volume des fuites d'eau en fonction du temps -Barrage de Bouhanifia

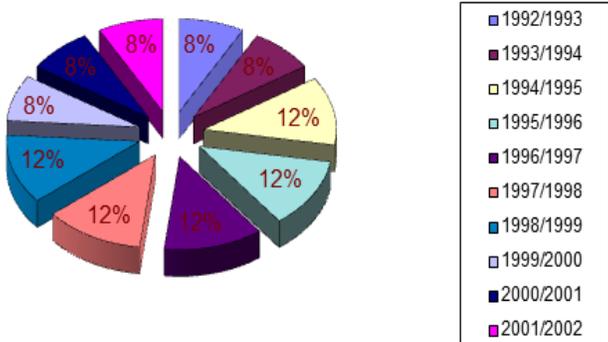


Figure 13 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs- Barrage de Bouhanifia

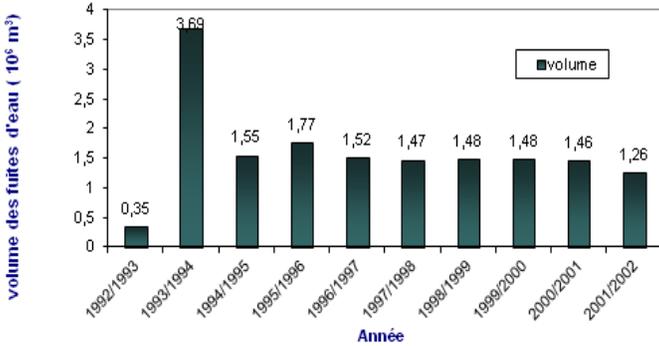


Figure 14 : Variation du volume des fuites d'eau en fonction du temps - Barrage de Gherib

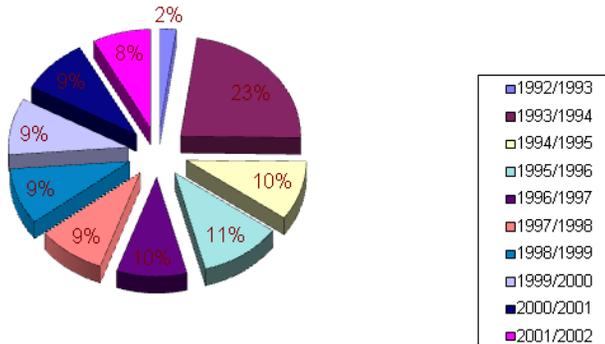


Figure 15 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs- Barrage de Gherib

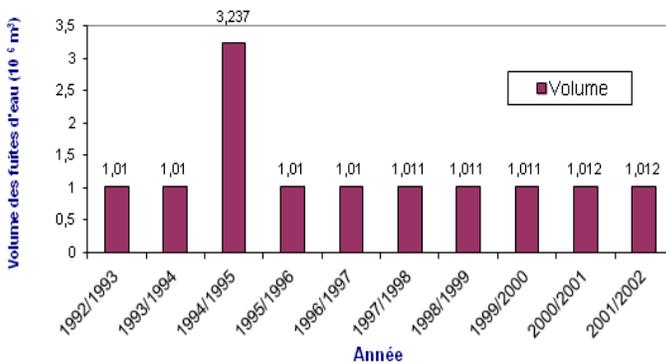


Figure 16 : Variation du volume des fuites d'eau en fonction du temps – Barrage de K'sob

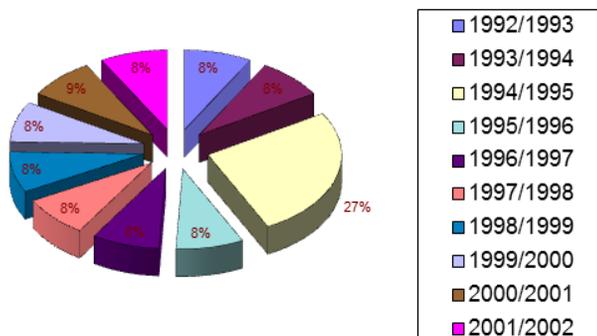


Figure 17 : Présentation du volume des fuites d'eau par secteurs- Barrage de K'sob

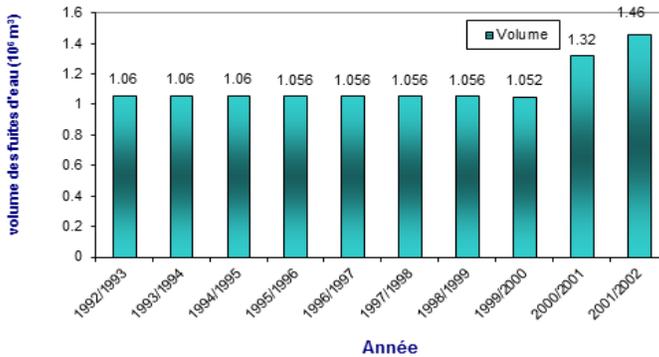


Figure 18 : Variation du volume des fuites d'eau en fonction du temps – Barrage de Zerdezas

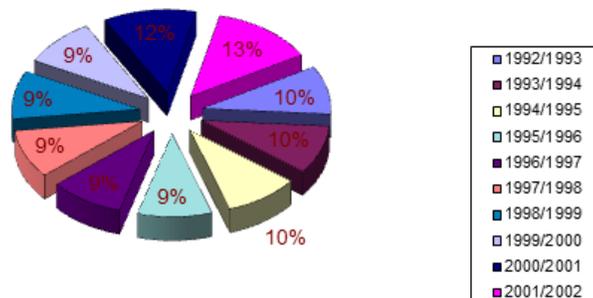


Figure 19 : Variation du volume de fuites d'eau en fonction du temps (%) - Barrage de Zerdezas

Les figures (2 à 19) montrent que les fuites d'eau dans les barrages algériens présentent une variabilité très nette dans le temps et dans l'espace et cela selon les conditions naturelles et la situation géographique du site de chaque barrage. Vu l'ampleur des fuites dans les barrages algériens, l'étude de ce phénomène complexe est devenu une nécessité absolue pour essayer dans la mesure du possible de trouver des solutions efficaces afin de réduire les volumes d'eau perdus inutilement et assurer une bonne stabilité à ces ouvrages hydrauliques. Du fait que les conditions climatiques et la situation géographique sont propres à chaque site, l'étude des fuites devait se faire cas par cas. A cet effet, nous avons jugé utile d'étudier les fuites d'eau au niveau du barrage de ouizert (wilaya de Mascara) qui est confronté sérieusement à ce problème épineux surtout que le volume de fuite dans ce dernier est en augmentation pour atteindre durant l'année 1995/1996 une valeur très remarquable de $23.34 \cdot 10^6$ m³/an.

CONCLUSION

L'étude des fuites au niveau des barrages du monde nous a permis de conclure que :

Le phénomène des fuites d'eau au niveau des barrages se traduit par des pertes considérables en eau précieuse et rares et aussi par des menaces très sérieuses de la stabilité des ouvrages hydrauliques. De plus, la plus part des barrages sont soumis à une perte de capacité due essentiellement à trois phénomènes à savoir : les fuites d'eau, l'envasement des retenues et l'évaporation intense.

Le problème des fuites d'eau est très complexe, il touche la majorité des barrages à travers le monde et qui ne peut être étudié de la même façon. En Algérie, nous avons recensé environ quinze barrages ayant des pertes par fuites qui dépassent 1 million de m³ par an chacun, parmi ces barrages six présentent un volume de fuite supérieur à 5 millions de m³. Le barrage de ouizert est l'un des barrages fortement sujets à ce problème et sa perte de capacité est en évolution à cause de l'augmentation des fuites d'eau. A ce titre, il faut régler le problème des fuites d'eau qui engendrent des pertes considérables en eau précieuses et rares et présente une menace pour la stabilité du barrage.

A la lumière de notre étude concernant les fuites d'eau au niveau des barrages Algériens, nous pouvons tirer les recommandations suivantes :

Le problème des fuites d'eau au niveau des barrages algériens est dû aux sites de ces ouvrages qui sont favorables aux fuites et défavorables au stockage d'une part et d'autre part au choix du type du barrage.

Le type du barrage doit être choisi en tenant compte du facteur débit des fuites probables et leurs variations au cours du temps. Ainsi on peut calculer le débit des fuites en utilisant la méthode des traceurs.

L'étude des fuites d'eau doit être prise en considération dans les études des ouvrages hydrauliques. Nous pouvons citer par exemple le cas des vallées fluvioglaciales au voisinage du lac San Marcos sis au pied de volcan Cayambe (Equateur), où la réalisation d'un barrage était projetée pour augmenter la capacité du lac mais l'utilisation de la méthode des traceurs a montré l'existence d'une couche géologique perméable d'une épaisseur dépassant 30 m suivie par une séquence de strates perméables et imperméables. En se basant sur ces résultats, le projet a été abandonné (Therond, 1980)

Une étude explicative du problème des fuites d'eau et ses répercussions sur le barrage est d'une première importance dans le but de trouver des remèdes à ce problème.

Il est nécessaire de traiter le problème des fuites d'eau au niveau des barrages algériens concernés cas par cas pour aboutir à des solutions efficaces à ce problème.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE NATIONALE DES BARRAGES ET DES TRANSFERTS (A.N.B.T) (2003). Détection des fuites d'eau dans les retenues des barrages Alger. 50 pages.
- AGENCE NATIONALE DES BARRAGES ET DES TRANSFERTS (A.N.B.T). (1986-2003). Bilan annuel d'exploitation des barrages Alger.
- BENFETTA H. (2009). Perte de capacité des barrages Algériens. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de Technologie Oran (USTO). 200 pages.
- COYNE B. (1994). Recherche des fuites sur le parement amont par la méthode des potentiels d'électrofiltration au barrage de LAC LONG. Rapport interne ANB Alger. 30 pages.
- DRIRE L. (2001). Le barrage de vieux prés France. Documentation française France 30 pages. EDF. (2002). Le barrage de Combes. Documentation française France. 30 pages.
- FRANK B. (2002). Catastrophes naturelles et techniques. Documentation française France. 5 pages.
- JEAN G. (1991). Réhabilitation Barrage Sayano Sibérie. Documentation française France. 10 pages.
- MESNEY M. (2004). Un grand barrage à haut risque. Saddam dam en Irak. Article revue houille blanche. SHF France.
- ROYET P. (2002). Rupture des petits barrages. Recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement. Cemagref France.
- THEROND R. (1980). Recherche sur l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique. Collection du centre de recherches et essais de Chatou. Editions Eyrolles Paris.