



TECHNIQUES DE DETECTION DU CHEMINEMENT DES FUITES DANS LES BARRAGES ET AUTRES RESERVOIRS ARTIFICIELS

TECHNIQUES FOR DETECTING THE PROGRESS OF THE LEAKS IN DAMS AND OTHER ARTIFICIAL RESERVOIRS

BENFETTA H.¹, ACHOUR B.², BOUDINA S.³, HOCINI N.⁴, OUADJA A.⁵

¹Université de Mostaganem, Département d'Agronomie, Mostaganem, Algérie

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

³Chef de projet – Agence Nationale des Barrages et des transferts, Algérie

⁴Centre de Recherche Nucléaire, Département d'Hydrologie et de Sédimentologie, Algérie

⁵Doctorant, Université de Mascara, Département d'Agronomie, Mascara, Algérie

benfettahassen@yahoo.fr

RESUME

La majorité des barrages et de retenues en exploitation présentent des problèmes de fuites qui sont très chers à réparer car le diagnostic des causes par le biais des méthodes conventionnelles est très souvent inadéquat. De plus, ils peuvent mettre en péril tous les biens et populations se trouvant en aval immédiat de l'ouvrage car elles sont capables de causer sa rupture. 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 surtout que La disponibilité des ressources en eau en Afrique est un problème très crucial touchant de plein fouet le bien-être des communautés en termes de santé et de génération de rentes par le biais de l'Agriculture et de l'Industrie. A cet effet, L'Agence nationale des barrages et des transferts s'est lancée dans un accord de coopération régionale Africaine (AFRA), accord inter-gouvernemental signé

entre plusieurs pays Africains, destiné à la promotion de l'utilisation des radioisotopes pour la résolution de problèmes socio-économiques urgents. Elle consiste à appliquer des techniques de traçage précises de localisation des fuites résultant en des coûts de réparation réduits. Ces techniques sont l'objet de nos recherches sur les fuites d'eau dans les barrages Algériens.

Mots clés : Détection- Fuites- méthode des traceurs- Barrages- Algérie.

ABSTRACT

The majority of dams and reservoirs in operation have leakage problems which are very expensive to repair because the diagnosis causes through conventional methods is often inadequate. In addition, they can jeopardize all goods and people is located immediately downstream of the structure because they are capable of causing it to break. The study of this phenomenon proves to be very important because it can endanger the stability of the dam and reduce its useful capacity especially as the water resource availability in Africa is a very crucial problem affecting the brunt the welfare of the communities in terms of health and annuity generation through Agriculture and Industry. To this end, the National Agency of Dams has launched an African Regional Cooperation Agreement (AFRA), inter-governmental agreement signed between several African countries, for the promotion of the use of radioisotopes for problem solving urgent socioeconomic. It consists in applying accurate tracing techniques for locating leaks resulting in reduced repair costs. These techniques are the object of our searches on water leaks in the Algerian dams.

Keywords: Detection- Leakage- Tracer method- Dams- Algeria.

INTRODUCTION

Les fuites d'eau dans les retenues des barrages résultent généralement d'anomalies de perméabilité des formations géologiques présentes au site d'implantation de ces ouvrages. Il est rare que les fuites affectent le corps même de l'ouvrage. La détection de ces fuites dans les retenues de barrages quels que soit leurs nature et destinée (irrigation, AEP, génération d'énergie) est d'un intérêt primordial relatif, tant du point de vue de l'économie mais reste quand même d'une importance primordiale quant à que de celui de la sécurité de l'ouvrage. Les fuites d'eau dans les retenues des barrages présentent un danger sur les biens et populations en aval d'un barrage et engendrent des pertes

économiques à cause de travaux d'étanchéité mal programmés (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Benfetta, 2007). A cet effet, il est important de déceler avec précision les zones de fuites avant que celles-ci n'impliquent des désordres importants dans l'ouvrage, avec les conséquences attendues, des deux tant du point de vue de l'économie que celui de la sécurité citée plus haut. Les pertes d'eaux importantes engendrées par les fuites pourraient amener dans certains cas carrément à l'abandon des barrages. Au regard de la variété et du nombre important de caractéristiques qui peuvent entrer en jeu pour chaque site d'investigation, une procédure générale prête à l'emploi n'existe malheureusement pas et chaque cas de détection des fuites devra être traité individuellement. Il n'existe pas de procédure générale pour traiter le problème des fuites. La technique à utiliser doit être choisie en fonction des caractéristiques de chaque barrage à étudier (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Benfetta, 2007). Pour étudier la localisation des fuites d'eau sur des barrages, il est très nécessaire de faire une reconnaissance des paramètres hydrogéologiques et géologiques de la région avant tout travail de terrain proprement dit. Ainsi, les informations récoltées lors de cette phase préliminaire permettront aux chercheurs d'émettre des hypothèses sur le comportement du système ainsi que sur les emplacements les plus probables de constituer les zones de décharge et d'infiltration. Parmi les informations les plus importantes à considérer, on peut citer : Les données géologiques (nature des terrains, présence de failles,...), les données climatologiques (signal des précipitations), l'inventaire et informations sur les sources et autres résurgences, les températures du réservoir (existence d'un gradient en fonction de la profondeur) et la température au niveau des résurgences, la variation du niveau d'eau dans le réservoir, la variation du débit des sources et des résurgences, les indications sur la piézométrie de la région et ses fluctuations, les signatures géochimiques et isotopiques de chaque masse d'eau en présence dans le système étudié (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Benfetta, 2007). Il est également important de connaître les résultats de l'étude de faisabilité du barrage, du fait qu'elle pourrait receler des informations essentielles exploitables pour le reste du travail d'investigation. Les investigations hydrogéologiques et géologiques d'une région rendent difficile toute approche théorique en utilisant les techniques conventionnelles telles que les méthodes piézométriques, géophysiques et celle relative à l'injection d'eau. De ce fait des études complémentaires doivent être entreprises par des mesures en vraie grandeur réalisées sur le site même. A ce titre, nous allons présenter la méthode des traceurs et des isotopes, les caractéristiques géométriques spécifiques des fuites d'eau et l'essai de Lugeon. La technique des traceurs chimiques et isotopiques (stables ou radioactifs), a une grande importance dans la localisation des chemins de circulation d'eau à travers le massif rocheux (aux

environs du barrage). Pour les caractéristiques géométriques spécifiques des fuites d'eau, les projets récents permettent de définir les périmètres de fuites, et d'autre part des surfaces mouillées. L'essai de Lugeon permet de déterminer les zones absorbantes afin d'éliminer les débits de fuites, le type d'injection (consolidation ou étanchéité) et le type de produit d'injection (coulis stable ou instable) (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Benfetta, 2007).

TECHNIQUES DES TRACEURS

Les fondements de la technique de traçage en hydrologie sont simples et sont basées sur le repérage, et la mesure des concentrations en substances chimiques, en colorants, en isotopes stables ou radioactifs présents en un point précis du cycle hydrologique. Les traceurs peuvent donc être définis comme étant des substances identifiables lesquelles, par l'examen et le suivi de leur comportement dans un milieu mobile (mouvant) peuvent être mis à profit pour déduire le comportement général du milieu dans lequel ils évoluent. On peut en règle générale les classer selon leur origine, en deux grandes catégories. Ceux qui sont normalement présents dans le milieu sont généralement appelés traceurs environnementaux (de l'environnement) ou passifs ; On parlera également de traçage naturel (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009). D'autre part, ceux qui y sont délibérément introduits dans le milieu étudié où ils sont supposés être absents ou très faiblement représentés sont dits traceurs artificiels ou actifs; On parlera alors d'ensemencement et de traçage artificiel. Celui-ci est particulièrement adapté aux systèmes et aux phénomènes hydrologiques à pas de temps brefs ou à des mailles spatiales courtes. Son efficacité s'impose donc dans les études d'eau de surface, de circulations souterraines (recharge, écoulement) rapides qui est le cas des systèmes fissurés et karstiques ou des nappes libres. Un traceur est une substance que l'on introduit dans une masse d'eau, afin de suivre le cheminement des eaux souterraines et déterminer la vitesse d'écoulement souterrain. Leur utilisation est très répandue pour suivre le trajet des eaux, depuis la retenue d'un barrage (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009). Jusqu'aux résurgences qui apparaissent à l'aval de l'ouvrage, ce qui permet de mettre en évidence les éventuels relations entre la retenue et les pertes enregistrées à l'aval, ainsi que les courts circuits hydrauliques engendrés par la détérioration du voile d'étanchéité. Si l'on veut déterminer la vitesse d'une circulation d'eau souterraine, il suffit de mesurer le temps mis par le traceur pour parcourir le chemin qui sépare son point de départ de son point d'observation. Mais si l'on désire évaluer le débit d'un écoulement, il faut injecter à l'amont un débit donné d'une eau renfermant une concentration

connue de traceur et déterminer la concentration du traceur contenue dans les échantillons d'eau de la nappe prélevés à l'aval (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009).

Caractéristiques d'un traceur

Un traceur idéal doit avoir les caractéristiques suivantes : Il ne doit pas être présent dans la masse d'eau étudiée, sauf en quantité suffisamment infime pour que sa présence n'amoindrisse pas le contraste entre les observations amont et aval. Il ne doit pas avoir d'action chimique sur le terrain. Il ne doit pas être absorbé, ni retenu par le terrain. Il doit être facilement véhiculé par l'eau. Il ne doit avoir aucune action chimique sur l'eau et ne pas pouvoir être détruit par les micro-organismes. Il ne doit pas être nocif ni pour l'homme ni pour la faune aquatique (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980).

Les différents types de traceurs

Les traceurs sont des substances identifiables qui peuvent être classés selon leur origine en deux catégories : passifs et actifs.

Traceurs artificiels (actifs)

Ils sont supposés être absents ou très faiblement représentés dans le milieu, comme par exemple le sel de table (NaCl), le brome (^{82}Br), l'iode (^{131}I), technétium 99m et le tritium (^3H) sous forme d'eau tritiée, il s'agit ici de traçage artificiels (Maurice, 1980).

Traceurs environnementaux (passifs)

Ils sont normalement présents dans le milieu, comme par exemple les traceurs naturels de l'eau (tritium « ^3H », deutérium « ^2H » et l'oxygène « ^{18}O ») et le carbone inorganique total dissous (CITD), on parle ici de traçage naturel (Maurice, 1980).

Les traceurs artificiels

Les traceurs artificiels les plus adéquats qui présentent les meilleures options et qui ont prouvé leur efficacité sont :

A - Traceurs colorants : Ils sont utilisés généralement dans les roches Karstiques où ils donnent de bons résultats et rarement dans le sol fin. Les traceurs les plus utilisés sont les Fluorescéines (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980).

B - Traceurs Fluorescents : On les utilise généralement dans les milieux consolidés mais ils peuvent être utilisés aussi pour de courtes distances dans les milieux granulaires (quelques centaines de mètres). Ils sont introduits dans la nappe sous la forme d'une solution ayant les concentrations suivantes : (¼ de litre de NH₄, 5 litres d'alcool, 50 litre d'eau, 1 d_aN de fluorescéine). Le poids p est donné par la formule suivante :

$$p = K \frac{qL}{u} + 0,02v$$

Avec : K = 0.5 → cas de circulation de fissure. K = 3 → dans les sols.

Il faut noter aussi qu'ils existent d'autres traceurs utilisés en eaux alcalines ou acides, dans les eaux alcalines on utilise l'éosine, le rouge Congo et l'érythrosine. Ces substances sont dissoutes dans une eau alcaline avant de les introduire dans la nappe, par contre dans les eaux acides, on préfère injecter du bleu de méthylène, du bleu d'aniline et du rouge ponceau (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980).

Les Traceurs Radioactifs

Ils sont caractérisés par les propriétés suivantes : être facilement détectable sous faible concentration, être soluble dans l'eau, ne pas être absorbé ni arrêté par le sol, ne pas présenter de danger de pollution de la nappe.

Parmi les émetteurs de (β) on a le Tritium (³H), le phosphore 32, le soufre 35 et le carbone 14. Pour les corps émettant simultanément les rayonnements (β) et (γ), on a le sodium Na₂Co₃, l'Iode 131, le Fer 59 et le Cobalt 60.

Complexes anioniques

Il est préférable d'utiliser des complexes anionique qui ne seront pas retardés lors de leur cheminement en compagnie de leur élément vecteur l'eau car les mailles minérales des couches géologiques sont chargées négativement. Des complexes d'EDTA de Brome, d'Iode et d'Indium ont été suggérés mais très peu utilisés. L'usage de NH₄Br a été rapporté avec succès pour un barrage Mexicain et le traceur a été détecté à une résurgence, plusieurs mois après

l'injection. Les concentrations de ces substances sont détectées par activation neutronique (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Maurice, 1980).

Les Brome-82 et l'Iode-131 : Ces radiations ont démontré à plus d'un titre leur bon comportement dans la majorité des cas, où ils ont été utilisés. Leur seule contrainte réside dans leur demi-vie (~ 36h et 8j respectivement) qui ne leur permet pas d'être utilisés pour des temps de transit assez long surtout pour ⁸² Br (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980). **Le tritium artificiel** est utilisé sous sa forme la plus simple (l'eau tritiée), c'est le meilleur traceur qui permet d'aboutir à des résultats quantitatifs précis quand les temps de transit sont longs et de grands volumes d'eau sont étudiés mais sa longue demi-vie (4500j) devient un désavantage. Il marque en fait durablement le milieu, ce qui peut être assimilé à une contamination certes pas du tout dangereuses pour l'homme et l'environnement, mais qui interdit la répartition de l'expérience sur le même site. Son utilisation devra être le dernier recours après avoir essayé sans succès les autres traceurs. **Les traceurs chimiques solubles** sont détectés par des réactions chimiques simples ou bien par des mesures de résistivité électrique, ils sont bien véhiculés par l'eau. Leur utilisation nécessite des injections sous concentrations élevées. Les traceurs chimiques les plus utilisés sont les chlorures (NH₄Cl, C_aCl, N_aCl, L_i Cl), le poids P est donné par la formule suivante :

$$p = \frac{qL}{u} + 0,1v$$

Avec : p exprimé en d_a N, L : longueur à parcourir dans le sol (en mètres), q : débit sortant au niveau de la résurgence (m³/s), u : vitesse du courant souterrain en mètre/jours, v : réserve d'eau souterraine en milliers de m³. On mesure la concentration de l'eau en traceur en fonction du temps en un point d'observation situé à une distance connue du point d'injection. L'injection peut se faire soit par impulsion soit en continue (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980). L'injection par impulsion consiste à faire des injections de courtes durées en amont du point d'observation, c'est une méthode très répandue, on injecte le traceur dans le puits d'injection pendant quelques instants seulement, puis, avec le même débit, on injecte une eau identique à celle de l'aquifère. Cette méthode dont nous parlons à propos des traceurs chimiques peut être utilisée avec n'importe quel traceur et elle est adoptée en particulier avec les traceurs radioactifs. Sur la figure (1), nous représentons la courbe de concentration en injection par impulsion (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980) :

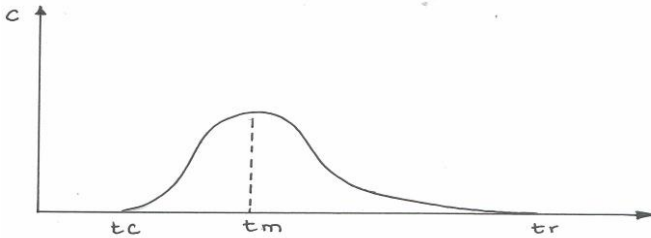


Figure 1 : Courbe de concentration en injection par impulsion

La courbe de concentration présente une allure en cloche, symétrique s'il n'y a pas absorption du traceur, asymétrique dans le cas contraire, c'est à dire dans le cas général. L'apparition du traceur correspond au temps t_c , à partir duquel, la concentration croît jusqu'au temps t_m puis décroît jusqu'à t_f qui correspond à la disparition du traceur (ANBT, 2003 ; Boudina, 2009 ; Maurice, 1980). Le temps moyen d'apparition du traceur est : $t_m = (t_c + t_f)/2$. Il correspond au maximum de la courbe dans une distribution symétrique, la courbe est symétrique s'il n'y a pas absorption du traceur, asymétrique dans le cas contraire.

$$A(t) = \int_0^t C(t)dt$$

Si on trace la courbe cumulative de la concentration : C' est à dire la courbe obtenue en faisant correspondre à chaque valeur de t l'aire comprise entre la courbe $C(t)$ de la figure (1) et la droite d'abscisse t , Le temps t_m est confondu avec le temps médian $t_{0.5}$ (ordonnée : $A(t_f)/2$) si la distribution est symétrique. Si la distribution est dissymétrique ($t_m < t_{0.5}$), on adopte comme vitesse celle qui correspond au centre de gravité de la surface limitée par la courbe. Cette vitesse n'est vraiment représentative de l'écoulement que lorsque l'étalement vers la droite de la courbe $C(t)$ n'est pas trop important, si l'étalement est très prononcé, c'est un indice de forte adsorption du traceur. Celui-ci est alors à rejeter.

Injection continue : Le principe de cette méthode est simple, on injecte un débit constant dans la nappe et on mesure le temps que met le front du traceur pour arriver au point d'observation. Il faut éviter de perturber la nappe et, par conséquent, pomper dans le forage d'injection un débit égal à celui qu'on injecte. L'injection continue nécessite de très grandes quantités de traceur, ce qui peut éventuellement, en limiter l'intérêt. Elle permet d'évaluer la vitesse d'un écoulement et dans certains cas, le débit d'une circulation souterraine (ANBT, 2003 ; Maurice, 1980). D'après la figure (2), on constate que les filets

les plus rapides arrivent au point d'observation au bout d'un temps t_1 , la courbe croît très rapidement jusqu'au temps t_2 et puis elle devient de plus en plus lente jusqu'au temps t_3 , à partir duquel la courbe reste constante. D'après Danel, la vitesse réelle moyenne de l'écoulement V_{moy} est liée à la vitesse maximale par la relation : $V_{\text{moy}} = V_{\text{max}} / 2.3$; Elle peut descendre jusqu'à : $V_{\text{moy}} = V_{\text{max}} / 3$, **N.B :** Cette méthode est très imprécise. La détermination de la concentration peut se faire directement par analyse chimique des échantillons prélevés dans les puits d'observation mais cette méthode est longue, laborieuse et peu pratique. La valeur absolue de la concentration nous intéresse peu, on peut se contenter de mesurer un paramètre proportionnel à cette concentration comme par exemple la résistivité de l'eau en mouvement (Maurice, 1980).

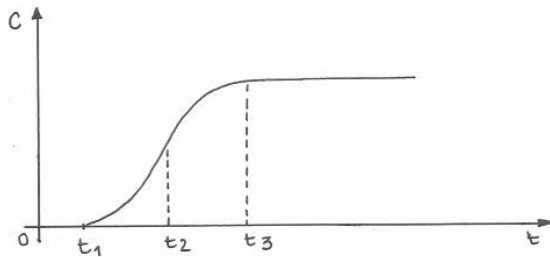


Figure 2 : Courbe de concentration en injection continue.

Utilisation des isotopes de l'environnement : Les isotopes dits de l'environnement sont ceux dont les variations naturelles de concentration au cours du cycle de l'eau permettent leur utilisation comme traceurs. En complémentarité avec la chimie classique, les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le tritium (^3H), l'oxygène-18, le deutérium, et le carbone-13 (Maurice, 1980).

Deutérium, oxygène-18, carbone-13 : L'oxygène-18 et le deutérium sont des isotopes stables constitutifs de la molécule d'eau. (Traceurs intrinsèques). Le carbone-13 est par contre celui de la forme dissoute (bicarbonates) (Maurice, 1980). L'abondance de ces isotopes, est mesurée au spectromètre de masse, et s'exprime en part pour mille (‰) par rapport à un standard de référence international, appelé SMOW (Standard Mean Ocean Water) pour ^{18}O et ^2H et PDB (Pee Dee Belemnite) pour le ^{13}C (Figure 3). Elle est donnée par la formule:

$$\delta_E = \frac{R_E - R_S}{R_S} \times 1000 \begin{cases} \delta_{PDB} = 0\text{‰} \\ \delta_{SMOW} = 0\text{‰} \end{cases}$$

- Où δ est la composition isotopique de l'échantillon (en ‰)
 R_E est le rapport isotopique (isotopes lourds / isotopes légers)
 R_S est le rapport isotopique du standard

Dans le cycle global de l'eau, chaque partie dispose de sa propre signature ou empreinte isotopique, ce qui nous donnera l'opportunité et la chance de différencier entre chaque entité hydrique en présence dans un système. Les variations naturelles de la composition isotopique de l'eau résultent de facteurs comme: l'altitude, la latitude, la continentalité, les variations saisonnières. Les changements de température mais aussi de phase tels que, l'évaporation et la condensation qui régissent les précipitations, entrent aussi en jeu.

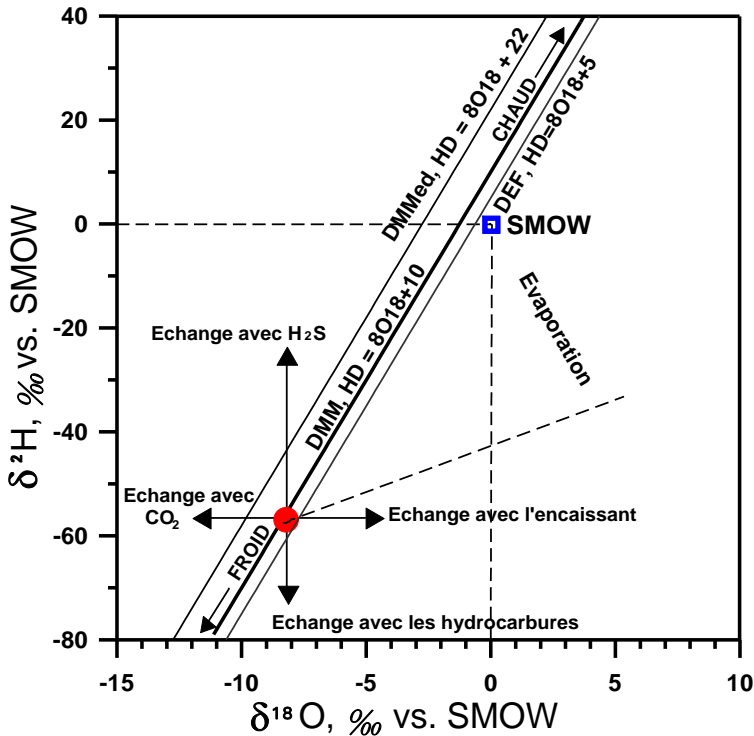


Figure 3 : Corrélation $\delta D - \delta^{18}O$ pour les eaux naturelles

Le deutérium et l'oxygène-18 appelés également isotopes lourds sont donc de précieux outils pour différencier ou éventuellement corrélérer les eaux d'une retenue et celles des eaux souterraines et des autres masses d'eau présentes dans une région. Ces eaux contiendraient ainsi des différences significatives dans leur composition isotopique. On parlera alors d'enrichissement ou d'appauvrissement isotopique. Comme les cas et les sites d'étude changent selon les conditions climatiques et géographiques, il arrive même que l'application de tous les outils isotopiques confortés par l'hydrochimie, ne fournissent pas assez d'arguments irréfutables ou convaincants sur l'origine et les schémas de mélange des différents types d'eau en présence dans un système. C'est le cas notamment lorsque la proximité des zones de recharge et les courts temps de transit d'une eau souterraine locale ne permettent pas de faire une franche distinction en termes de signatures chimiques et isotopiques (milieu fissuré par exemple). Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du Carbone Inorganique Total Dissous (CITD) peut être alors utilisé avec succès pour élucider des cas de fuites dans les zones tempérées et/ou tropicales ou encore dans des régions où la végétation n'est pas très abondante, et où les plantes du cycle photosynthétique de type C4 dominant. En effet, la plupart des eaux de surface se caractérisent par des valeurs en C-13 enrichies du moment qu'étant en contact avec le CO_2 atmosphérique, elles s'équilibrent avec sa teneur comprise entre -6 et -8‰ vs. PDB. D'un autre côté, les eaux souterraines sont généralement, caractérisées par des valeurs plus négatives (-11 à -17‰), ce qui donne un contraste isotopique de plusieurs 'pour mille' entre les deux eaux. D'autres sources de gaz carbonique peuvent amplifier ou au contraire atténuer le contraste qui pourrait exister entre le signal d'une eau de surface et celui de l'eau souterraine. C'est le cas notamment en terrain volcanique ou métamorphique où l'alcalinité des eaux est très basse et où la contribution de sources de CO_2 profond peut affecter le $\delta^{13}\text{C}$ de l'eau jusqu'à inverser la tendance pour avoir une eau de surface plus appauvrie en carbone-13 qu'une eau souterraine (-3 à -4 ‰) (Figure 4). Ce sont là quelques potentialités des rapports isotopiques en C-13 du Carbone Inorganique Total Dissous (ANBT, 2003, Benfetta, 2007, Maurice, 1980).

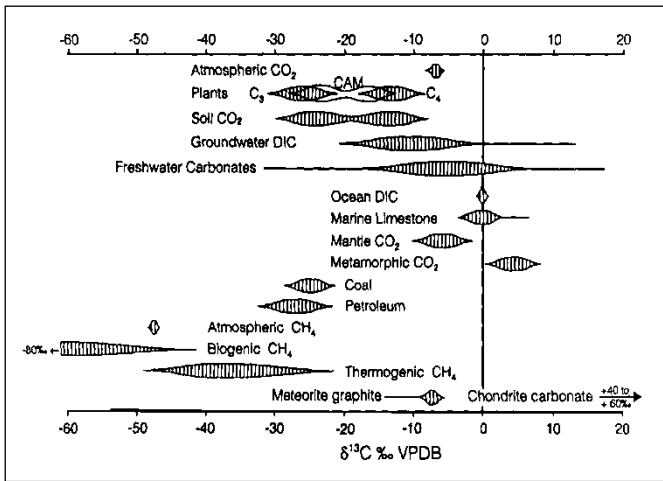


Figure 4 : Potentials des rapports isotopiques en C-13

En résumé, on peut dire que les variations spatio-temporelles en indicateurs naturels permettent d'établir ou de réfuter l'existence de relations entre le réservoir et les exurgences mais aussi de préciser la manière dont se fait la circulation de l'eau. L'existence d'informations du même type relatives aux eaux de précipitation, aux eaux de surface ainsi qu'aux eaux souterraines ayant des connexions avec le site d'étude seront également d'un apport certain dans la compréhension des phénomènes ayant lieu dans le système considéré (ANBT, 2003, Benfetta, 2007, Maurice, 1980). **Le Tritium (^3H)** bien qu'étant radioactif obéit presque identiquement aux mêmes règles de fractionnement que ceux auxquels sont soumis les isotopes stables. Il fait partie intégrante de la molécule d'eau et pourra donc informer à peu de choses près, de la même manière que le feraient l'Oxygène-18 et le Deutérium. Le tritium est le seul isotope radioactif de l'hydrogène, sa désintégration s'accompagne d'un rayonnement β mou ($e_{\text{max}} = 156 \text{ keV}$) avec une période de 12,32 ans (4500 jours). Il est produit naturellement par l'action de rayons cosmiques sur les atomes de l'azote dans la haute atmosphère puis intègre le cycle de l'eau, après oxydation. lorsqu'il est présent dans un système et une fois isolé de tout apport ou de renouvellement extérieur, il décroît en fonction du temps et voit ainsi son stock diminuer et jusqu'à disparaître complètement. Les teneurs en tritium mesurées par comptage en scintillation liquide après un enrichissement électrolytique préalable, sont exprimées en Unités de Tritium (U.T.) (ANBT, 2003, Benfetta, 2007, Maurice, 1980). L'équilibre entre sa production naturelle et sa désintégration donne suivant les régions et le type d'eau, une teneur en tritium de 0 à 40 UT. Cependant, depuis le début des expériences thermonucléaires atmosphériques la

teneur dans l'atmosphère a augmenté considérablement pour atteindre son maximum en 1963 et dépasser largement les 1000 UT. Depuis le moratoire sur les essais nucléaires atmosphériques, la concentration a décliné régulièrement pour atteindre actuellement le niveau de la concentration naturelle (~10 UT, hémisphère nord et autour de 5 UT dans l'hémisphère sud). L'utilisation du tritium contenu dans l'eau intervient notamment dans le cas où une différence dans la composition en isotopes stables des eaux de la retenue et des autres eaux souterraines n'est pas significative. Cependant, il peut être injecté comme traceur artificiel en cas de nécessité, généralement sous forme d'eau tritiée. Il se comportera alors exactement de la même manière que l'eau à marquer et rendra compte fidèlement de ce qui s'y passe. De plus il ne pose pas de très grands problèmes du point de vue de son utilisation pratique et peut être utilisé dans de très grandes activités sans danger pour l'homme et l'environnement.

Expériences de traçage au sein du réservoir : Ces expériences sont menées afin de localiser avec précision les zones d'infiltration qui se situent au sein de la retenue (fond ou berges). La plupart des techniques utilisées sont basées sur les méthodes radioactives de marquage. Cependant, il y a des cas pour lesquels on utilise également les traceurs fluorescents. À cause des difficultés inhérentes à leur mise en application au regard des volumes et surfaces mises en jeu, ces méthodes doivent être utilisées dans l'ultime phase de l'étude. Pour une meilleure efficacité, toutes les informations existant au préalable doivent être mises à contribution pour le succès de cette étape et une idée assez précise des zones d'infiltration et de l'exutoire des fuites, devra être disponible (données géologiques, profils de température, anciens cours de rivière, chemins préférentiels de sources,...) (figure 5). Dans ce qui suit sont décrites quelques techniques qui ont été utilisées pour la détection des zones de fuites et d'infiltration au niveau des retenues de barrage principalement par l'utilisation des traceurs radioactifs (ANBT, 2003, Benfetta, 2007, Maurice, 1980).

La Migration du Nuage Radioactif : Cette méthode est à mettre en œuvre aux endroits où les fuites et infiltrations sont suspectées se passer. C'est à dire, qu'une idée préalable des lieux où le phénomène est susceptible de prendre place est déjà disponible. Le principe de cette technique est basé sur l'injection d'une grande activité (estimée à plusieurs Curies) d'un radioélément émetteur gamma comme par

Exemple : ^{82}Br , ^{131}I , ^{198}Au , ^{51}Cr , ^{46}Sc . L'injection sub-lacustre est faite en un point de la retenue qui doit être proche du fond. Une surveillance de la migration du nuage radioactif est alors effectuée par le biais des détecteurs à scintillation submersibles adéquats. Les courants subaquatiques créés par

l'infiltration de l'eau attire peu à peu le nuage vers la zone recherchée où il est finalement intercepté et disparaît (ANBT, 2003, Benfetta, 2007, Maurice, 1980).

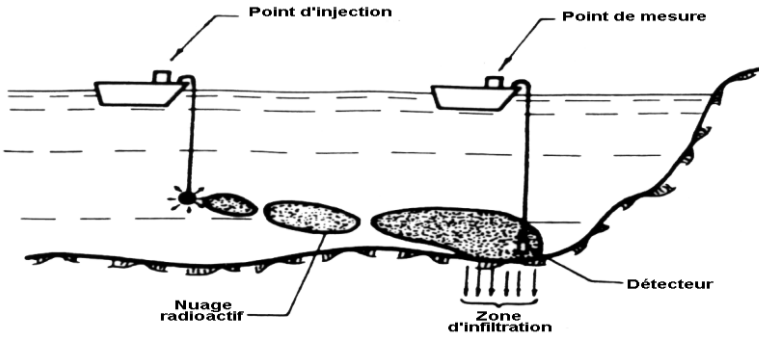


Figure 5 : Illustration schématique de la technique de migration du nuage radioactif

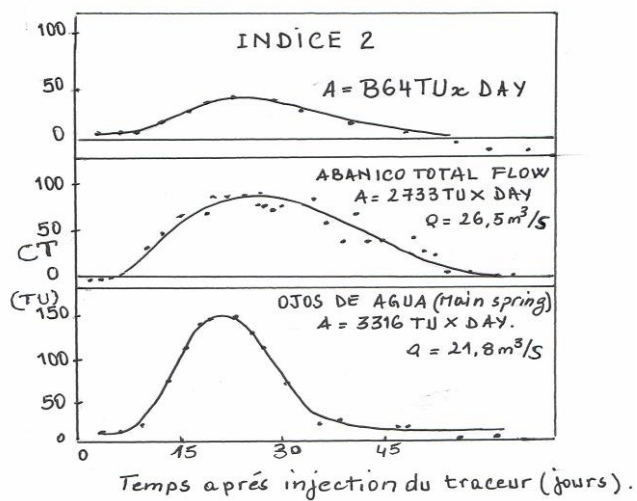


Figure 6 : Courbes de restitution du tritium injecté dans le lac Laja sis au Chili

De plus, si le traceur est détecté aux résurgences (sources, drains, ...), il devient certain que la zone d'infiltration est contenue dans la région de dernier contact du nuage avec le fond de la retenue. Outre cela, la variation de la concentration du traceur en fonction du temps peut renseigner sur le type fuite auquel on est confronté (diffuse, canalisée, ...). Cette expérience peut alors être répétée à petite échelle pour affiner les résultats trouvés auparavant. Cette méthode n'est néanmoins pas aussi facile à mettre en œuvre qu'on le pense et les difficultés pratiques peuvent émerger pour plusieurs raisons. C'est le cas

notamment lorsque les vitesses d'infiltration sont basses et que les courants générés par les vents viennent perturber la dispersion du nuage et le déplacer loin des zones recherchées. Une autre contrainte est la nécessité de plusieurs opérateurs pour le suivi et les mesures de la radioactivité, mais aussi le positionnement précis des points de mesure qui doit se faire à l'aide d'observateurs à théodolites ou plus récemment à l'aide des GPS différentiels. Il arrive aussi qu'en présence d'une thermocline, le réservoir soit bien stratifié ce qui voudra dire que c'est plutôt les flux horizontaux qui vont prévaloir avec les conséquences indésirables qui en découleront (dispersion selon des plans horizontaux). Il est effectivement arrivé qu'une solution d'activité équivalente à 1 Ci de $^{46}\text{Sc-EDTA}$ ait été injectée à 10 m du fond de la retenue et dont le nuage s'est répandu sur $\sim 2 \times 10^5 \text{ m}^2$ de surface et moins de 1 m d'épaisseur. Le traceur n'a jamais eu le temps d'arriver au point de résurgence qui n'était sis qu'au pied de l'ouvrage même (Maurice, 1980).

La méthode de confinement et d'adsorption du traceur : Cette technique est, de même que la précédente, basée sur l'injection et le suivi d'un nuage de radiotracer au voisinage du fond ou des parois, des berges ou de l'ouvrage. Cependant la forme du traceur doit être choisie de façon à ce que les courants l'entraînent vers la zone recherchée et qu'il soit concentré par adsorption au niveau des matériaux et sédiments constituant la zone d'infiltration. Plusieurs types de solutions de radiotraceurs ont été essayés, et adoptées parmi celles-ci, l'Or-198 sous forme d'acide chloro-aurique ou de solution colloïdale de sédiments fins marqués, aura montré de belles dispositions qui lui ont conféré le titre de traceur de choix spécifiquement pour ce créneau (Maurice 1980). D'autres radioéléments comme l'Indium-113m sous forme de chlorure ($^{113\text{m}}\text{InCl}_3$) ou le Fer-59 et l'Iode-131 sous forme d'émulsions de bitume ou de résines échangeuses d'ions ont également été parfois utilisés. Lorsque des solutions colloïdales de fins sédiments marqués, de résines échangeuses d'ions ou bitumineuses sont utilisées, leur densité étant plus grande que celle du milieu, elles auront tendance à se déposer au fond de la retenue. Dans de tels cas, l'effet des courants de fonds sur ce genre de solutions traçantes n'est pas très connu. D'autre part, des solutions salines stables ou radioactives peuvent également être mises en application pour la recherche de zone d'infiltration au fond des réservoirs. Étant plus denses, elles s'accumulent au sein de dépressions. Il reste toutefois à signaler que les fuites n'ont pas lieu qu'au niveau de dépressions (Maurice, 1980). L'injection peut se faire soit au niveau du lac en un ou plusieurs lieux définis, soit au niveau de piézomètres choisis en conséquence. Le choix le plus judicieux dépendra tout le succès de l'expérience et ceci n'est pas une tâche facile (ANBT, 2003). Injection au niveau de la retenue : Ceci sous-entend que les zones d'infiltration aient été déjà déterminées avec le plus de précision possible au moyen des méthodes décrites auparavant. Il ne faudra pas oublier surtout de prendre en compte l'influence possible des

courants sublacustres naturels (effet du vent, d'arrivée d'eau). Ce cas s'est présenté pour le réservoir de Laja où pas moins de 4 Ci de tritium au total ont été lâchés en cinq points du lac à 5 m du fond. Seuls 1.2 Ci a été restitués par le système au niveau des résurgences, qui correspond en fait aux injections 3, 4 et 5. Un temps de transit moyen de 25 jours a été calculé. Dans une seconde expérience, 20 autres curies de tritium ont été injectés en un seul point en surface où l'on pouvait constater de visu qu'une infiltration avait bien lieu. La restitution du traceur dans les résurgences a été très importante comme le montrent la figure (6) (Achour, 2016 ; ANBT, 2003).

Injection au niveau des piézomètres : Il est évident que des données précises sur la circulation d'eau dans le piézomètre choisi soient disponibles avant d'entamer cette expérience et il faut que le choix du piézomètre soit fait en fonction du débit assez important qui le traverse. Dans le cas contraire, l'injection du traceur devra être suivie par une injection de l'eau qui aura pour effet de forcer le traceur à s'écouler. Il faut donner une attention particulière aux flux verticaux ascendants et descendants dans les sondages qui peuvent entraîner le traceur vers des couches perméables n'ayant absolument aucune relation avec le phénomène des fuites et qui n'ont rien à voir ni avec la retenue, ni avec les résurgences. Le traceur injecté dans ces conditions pourra être piégé et perdu ou très retardé faisant ainsi l'échec de l'expérience. Les flux verticaux sont souvent le résultat du sondage lui-même qui crée une connexion hydraulique entre deux ou plusieurs horizons perméables où règnent des pressions différentes, séparés par une strate imperméable ou même plusieurs. Ce cas a été rencontré au lac de Laja où 2 Ci d'Iode -131 ont été injectés dans un piézomètre, où un flux vertical a été détecté auparavant et qui était sis à 700 m en aval. L'injection a eu lieu juste à hauteur du niveau piézométrique et cela pour que le traceur ait la possibilité d'être homogénéisé par le flux vertical sur toute la colonne filtrante. Sur la figure (7), nous présentons les courbes de restitution de l'Iode -131 au niveau des résurgences situées à l'aval du barrage Laja sis au Chili (Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Maurice, 1980).

Dans la figure (7), nous remarquons qu'après un jour de transit, une petite fraction de traceur atteint les résurgences considérées. D'autres pics de restitution de traceur ont été détectés, mais le gros a mis entre 15 et 20 jours pour arriver en quantité importante ce qui concorde avec les résultats des expériences précédentes au moyen du tritium artificiel. Cela signifiait qu'un chemin préférentiel existe entre la retenue et les résurgences et qu'il était à l'origine du premier pic observé. Le reste du traceur est transféré à moindre vitesse au travers d'horizons perméables plus profonds qui ne sont que d'importance secondaire par rapport aux fuites enregistrées. L'injection d'un

traceur au niveau du piézomètre nous permet aussi de mesurer la vitesse du flux à l'intérieur du piézomètre. En effet, un cas concret a été rencontré dans le piézomètre (P116) du réservoir de Colbum au Chili. Sur la figure (8), nous présentons la distribution des vitesses de flux ascendants en fonction de la profondeur qui ont été mesurées à l'aide de l'Iode-131(Achour, 2016 ; ANBT, 2003 ; Maurice, 1980).

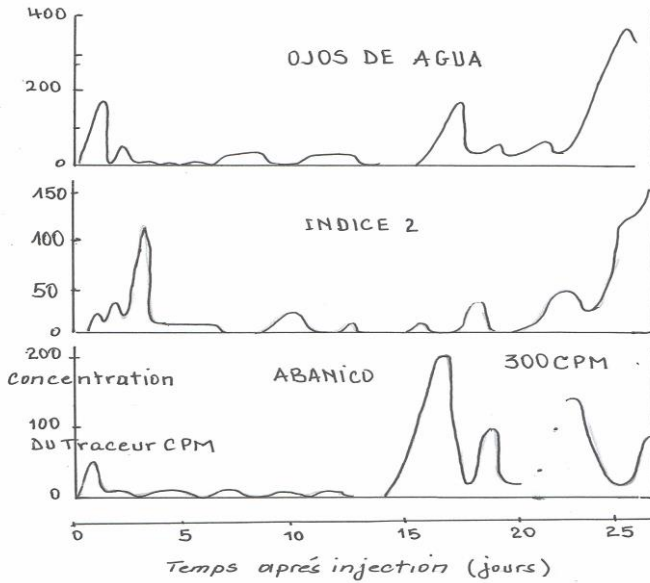


Figure 7 : Courbe de restitution de l'iode [3] injecté dans un piézomètre du Barrage Laja sis au Chili.

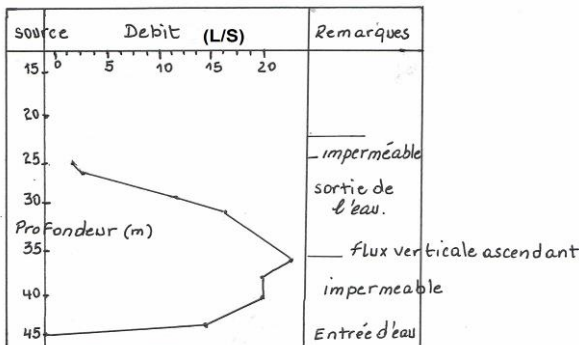


Figure 8 : Distribution de la vitesse en fonction de la profondeur dans le piézomètre 116 du réservoir de colbum sis au Chili

LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES SPECIFIQUES DES FUITES D'EAU

Périmètre de fuite

Il est courant pour un site donné de parler des lignes de fuites longues ou courtes, cette notion s'impose d'elle-même mais il est plus commode d'éclaircir cette notion et d'essayer de lui enlever de ce qu'elle a de subjectif. A cet effet, nous présentons la construction géométrique suivante : On considère un site quelconque défini par le barrage et la courbe de niveau correspondante à la côte de remplissage maximum pour laquelle les lignes de fuites sont courtes. Puis, on établit les constructions suivantes (Therond, 1980, Maurice, 1980) : On construit à partir du bord de la cuvette les lignes d'égal chemin minimum parcouru. Chaque ligne d'égal chemin parcouru (250m, 500m, etc.) est l'enveloppe des cercles centrés sur la courbe de remplissage maximum du réservoir et le rayon égal aux différentes distances. Une goutte d'eau provenant de la retenue située sur la courbe 250 par exemple aura parcouru au minimum 250 m. De la même manière, on construit les lignes d'égal chemin minimum à parcourir. Chaque ligne d'égal chemin minimum à parcourir (250 m, 500m ...etc.) est l'enveloppe des cercles centrés sur la courbe de niveau qui prolonge à l'aval du barrage la courbe de niveau de remplissage maximum, une goutte d'eau provenant de la retenue située sur la courbe 500 devra parcourir 500m au minimum pour sortir dans le versant. Il est possible de définir les périmètres de fuites à partir de ces deux familles de fuites. Si on réunit les points d'intersection des deux réseaux de courbe qui ont le même total (700), on aura une courbe qui limite une surface à l'intérieur de laquelle une circulation amont –aval, suivant un parcours en ligne droite ou brisée peut aller de la retenue à l'aval en moins de 750m. Au –delà de la ligne 750 par contre, il est possible à une circulation passant par le point A de court circuiter le barrage avec un trajet inférieur à 750 m (Therond, 1980, Maurice, 1980). Sur les figures 9 et 10, nous présentons les lignes d'égal chemin parcouru et celles à parcourir et le périmètre de fuites.

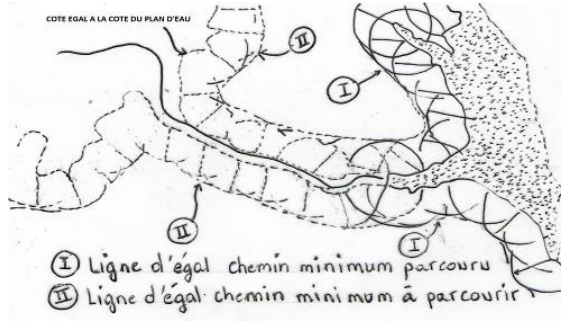


Figure 9 : Lignes d'égal chemin minimum parcouru et à parcourir

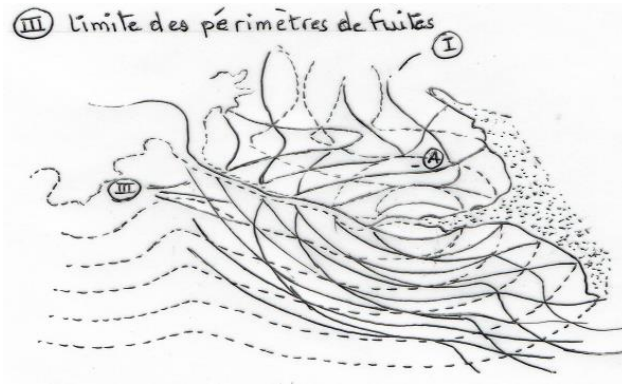


Figure 10 : Limite des périmètres de fuites

Utilisation pratique des périmètres de fuites

Les périmètres de fuites pour un site donné permettent de localiser un indice Karstique – aven, grotte – par rapport au barrage et de localiser aussi les zones d'absorption ou de résurgence. Ils indiquent une valeur minimum du cheminement nécessaire pour aller de la retenue au point considéré. La construction des périmètres de fuites a le grand avantage de tenir compte : de la localisation du barrage (position), de sa hauteur, de la morphologie de la retenue et de la vallée à l'aval du barrage, du voile d'étanchéité (Therond, 1980, Maurice, 1980).

Surface mouillée

La surface mouillée est définie comme étant la surface des terrains qui peuvent être noyés par la retenue, dans certains cas, elle peut être égale à la surface totale de la retenue. Théoriquement, le risque de fuites est proportionnel à la profondeur, en raison de la pression grandissante qui s'exerce sur les fissures et inversement proportionnel à la longueur des lignes de fuites. La figure 11 a été établie en tenant compte de la profondeur et de la longueur minimum des cheminements possibles à partir d'une zone. La surface mouillée est donc décomposée en surface élémentaire compte tenu de la longueur de lignes de fuites minimum et de la profondeur de la retenue (Therond, 1980, Maurice, 1980).

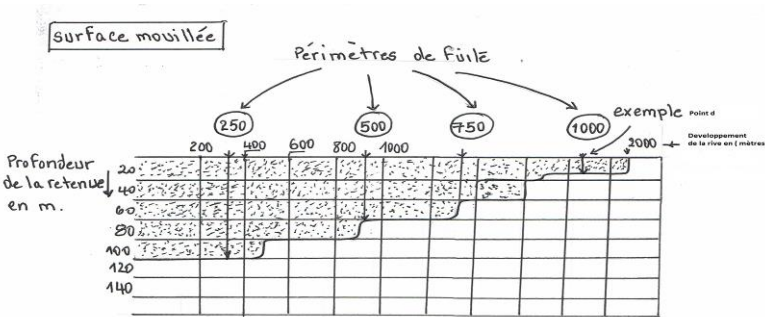


Figure 11 : Surface mouillée

Essai de Lugeon

Il est destiné à évaluer les possibilités de circulation de l'eau dans une roche et ne s'applique pas aux sols meubles, à l'exception des sols à cohésion très élevée. Le principe de l'essai de Lugeon est d'injecter de l'eau sous pression dans un élément de forage. Les lois qui régissent la circulation dans une roche sont différentes de celles d'un sol parce que la perméabilité d'une roche est une perméabilité de fissures alors que la perméabilité d'un sol est une perméabilité d'interstices. Quand les fissures de la roche sont peu nombreuses et très ouvertes, on constate que l'eau peut circuler facilement même sous faible charge avec un régime turbulent et non laminaire. Le phénomène de turbulence est accentué par la rugosité des parois. Dans le cas contraire, c'est à dire que les fissures sont très minces, il est évident que l'eau circule avec une forte charge avec un régime turbulent. On remarque qu'on ne peut appliquer la loi de Darcy

pour ces deux car cette loi s'applique pour les fissures qui sont réparties d'une manière à peu près homogènes et avec une certaine densité, de telle façon que l'écoulement présente un régime laminaire (par couches). De plus, ce régime dépend de la vitesse de l'eau et de la dimension des fissures d'où nous pouvons dire que dans une roche, la présence des deux régimes (laminaire, turbulent) est possible. De ce fait et du point de vue scientifique, l'essai de Lugeon n'est pas considéré comme un véritable essai mais un simple test qui permet de caractériser et de classer les roches en fonction de leur fissuration (Therond, 1980, Maurice, 1980). Il faut noter aussi que les débits injectés sont différents selon que le forage dans lequel est réalisé l'essai est parallèle à une fissure qu'il recoupe alors suivant deux génératrices, ou qu'il lui est perpendiculaire. Dans ce dernier cas, le débit est faible quoiqu'il s'agisse toujours de la même fissure. On voit donc toute l'importance qu'il ait à repérer le mieux possible les orientations des fissures de la roche. Le résultat de l'essai de Lugeon est représenté par un paramètre d'absorption de l'eau et son unité de mesure est lugeon (1lugeon = débit de 1 L / minute injecté dans un tronçon de forage de 1,00 m sous une pression de 1 Mpa, maintenue constante pendant 10 minutes (figure 12) (ANBT, 2003. Therond, 1980, Maurice, 1980).

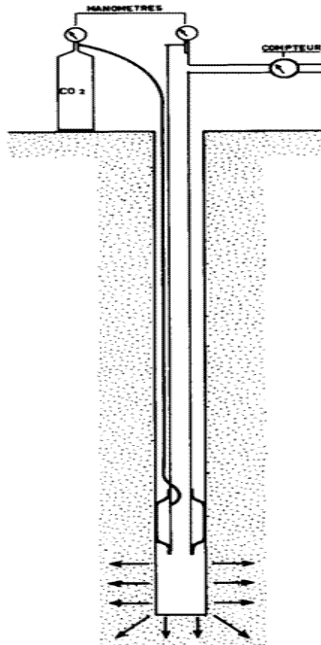


Figure 12 : Schéma d'un essai « Lugeon »

Application de l'essai de Lugeon

L'essai de Lugeon consiste à isoler une passe à la base du forage sur une longueur de 5 m puis réduire la longueur des passes jusqu'à 1.00 m ou 0.50 lorsque le rocher présente des fissures très importantes qu'on veut localiser. L'isolement de la passe se fait à l'aide d'obturateurs gonflables à l'eau ou au gaz comprimé (air ou CO₂). On doit mesurer le débit injecté sous une pression de 1Mpa maintenue constante pendant 10 minutes, pour cela, on doit monter la pression par paliers de 0.2 Mpa, chaque palier étant appliqué pendant 10 minutes. Si aucun claquage ne se produit et la fissuration de la roche le permet, l'essai peut se poursuivre jusqu'à 1.2 Mpa ou 1.4 Mpa. Ensuite, On relâche la pression par paliers décroissants d'une durée de 5 minutes seulement. Les volumes injectés durant chaque palier sont mesurés par un bac gradué ou par un compteur puis on déduit pour chaque palier le débit exprimé en litres / minute. On trace la courbe des débits en fonction de la pression (pour les pressions ascendantes et descendantes), étant entendu qu'il s'agit là des pressions corrigées (Therond, 1980 ; Maurice, 1980) :

$$P = P_m + \gamma_w h - P_c,$$

Avec : P_m : la pression donnée par le manomètre ; γ_w : la densité de l'eau ;

h : la distance verticale entre le manomètre et le niveau statique de la nappe ;

P_c : pertes de charges ;

Interprétation de l'essai de Lugeon

L'essai de Lugeon est donné par la formule suivante :

$$Q = \pi(p e^3) / 6\mu \text{Log}(R/r) ;$$

Avec : P : pression injectée ; e : ouverture de la fissure ; R : rayon à partir duquel la pression d'injection est nulle ; r : rayon du forage ; μ : viscosité de l'eau. D'après cette formule, on remarque que la courbe Q=f(p) ne peut pas être une droite et l'ouverture des fissures augmente avec la pression d'injection. Les variations d'ouverture des fissures sont en général faibles et l'approximation linéaire est parfaitement légitime (Therond, 1980 ; Maurice, 1980). En pratique, les courbes Q= f(p) sont loin de présenter des allures régulières comme le supposerait la théorie mais elles varient en fonction du comportement du massif et du type d'écoulement (laminaire ou turbulent). La figure 13 résume les variations de ces courbes. On peut pour l'interprétation remplacer la courbe par

sa tangente à l'origine quand l'écoulement est à tendance laminaire au début de l'essai. Toutefois, on limitera cette approximation au cas du colmatage à haute pression ou de l'écoulement turbulent car elle joue dans le sens de sécurité (Therond, 1980 ; Maurice, 1980). Dans le cas du débouillage, on relèvera directement sur la courbe la valeur du débit correspondant à la pression 1Mpa. Par contre, s'il y'a claquage, le débit caractérisant la roche est obtenu en extrapolant jusqu'à 1Mpa la courbe obtenue avant le claquage et il faut indiquer dans le compte rendu qu'il s'agit d'une extrapolation et de préciser de la pression de claquage (Therond, 1980 ; Maurice, 1980). Pour exprimer le nombre d'unités Lugeon, il faut ramener ce débit à une longueur de forage de 1.00 m, plus ce nombre est élevé et plus la fissure de la roche est grande : Si la longueur l de la passe d'essai est supérieure à 1.00m, le nombre de Lugeon est : $n = Q/l$; Q : débit en l / mn, (injecté sous 1 Mpa).

Si l est inférieur ou au plus égal à 1.00 m, il faut utiliser la formule $Q = mkHD$. Soit m_0 le coefficient de cavité d'un tronçon de 1.00 m auquel devrait correspondre un débit Q_0 et Q le débit injecté sous 1Mpa dans le tronçon de forage de longueur l et de coefficient de cavité m , on aura : $Q_0 = m_0 kHD$; $Q = m kHD$, $Q_0 = m_0 (Q)/M$; Le nombre de Lugeon est : $n = m_0 Q/m$; (Q en L/mn)

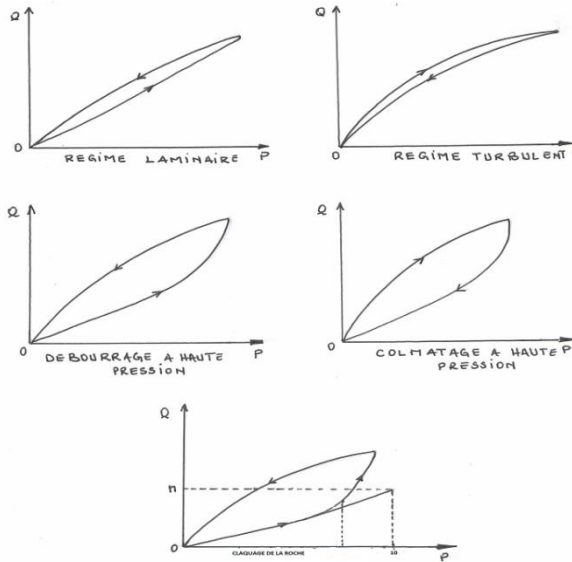


Figure 13 : Différentes formes de courbes d'essais ; Pour un nombre de Lugeon élevé, on peut dire que : * si le régime est laminaire, on a une grande densité de fissure. * si le régime est turbulent, les fissures sont peu nombreuses mais très ouvertes.

METHODE GEOPHYSIQUE

C'est la méthode la plus simple et la plus économique, elle ne nécessite la réalisation que d'un seul puits d'injection. Le cheminement du traceur est suivi depuis la surface du sol par des mesures de résistivité classiques, à l'aide d'un quadripôle. Il faut auparavant procéder à une mesure de la résistivité initiale de la nappe. Les méthodes électriques sont généralement très précises mais elles exigent que la concentration du traceur au point d'observation soit importante (Therond, 1980 ; Maurice, 1980).

DETECTION DES FUTITES PAR MESURES DE TEMPERATURES

Les ruptures et les endommagements de digues anciennes montrent que l'érosion interne, provoquée par des infiltrations, représente un risque important pour la stabilité et la sécurité des digues et des barrages. Cette forme d'érosion est d'autant plus dangereuse qu'elle peut subitement provoquer – sans signe avant-coureur évident – une destruction de l'ouvrage lorsque le réservoir est plein. Les zones d'infiltrations dans les digues sont souvent soumises à des procédés d'érosion. Par conséquent, il est nécessaire pour la sécurité des retenues de pouvoir détecter et délimiter des zones d'infiltrations dès leur premier stade de développement. Une inspection continue et un contrôle réalisés à partir de méthodes fiables et sensibles pour la détection de fuites sont donc d'une extrême importance. Les mesures de températures ont déjà été appliquées pour la détection de fuites dès les années cinquante. La température du fluide de la retenue va jouer le rôle d'un traceur naturel. L'infiltration du fluide de la retenue à travers la digue, provoquant des anomalies de températures dans son matériau, peut être détectée et localisée à partir d'une méthode de mesures des températures du sol développée par GTC (brevet n°. DE 4127646). L'utilisation de la méthode est simple et on peut ausculter rapidement et à moindres frais de longs secteurs de digues. Actuellement, plus de 500 km de longueur de digue et d'autres ouvrages hydrauliques ont été examinés avec de larges succès. L'exemple de la figure 14 montre la distribution des températures du sol dans une digue haute de 6m. Ces mesures avaient pour objectif de déterminer la profondeur des infiltrations d'eau à travers la digue afin de savoir si l'écoulement principal se situait dans le noyau de la digue ou sous le remblai de celle-ci. La cartographie des températures, en bas à gauche, montre que les deux mécanismes coexistent. Au km 40.580 et au km 40.620 l'eau s'infiltré sous le remblai de la digue et entre les km 40.650 et km 40.700 l'eau s'infiltré à travers le noyau de la digue en provoquant vraisemblablement une érosion interne. La

mise en évidence des zones en danger est encore améliorée par le calcul de l'écart entre les températures observées et les températures «normales» relevées sur un secteur de digue intacte (Heinrich, 2001).

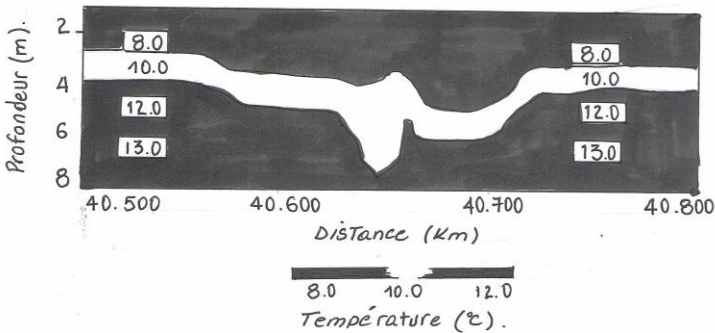


Figure 14 : Mesures des températures dans le corps de la digue

Le résultat, présenté sur la figure 15 illustre les perturbations de température provoquées par l'infiltration et indique les différentes zones où l'eau s'infiltrate à travers la digue. Dans le cas présent, les infiltrations reconnues sous le remblai de la digue résultent des conditions géologiques naturelles et sont inoffensives. Par contre les infiltrations à travers le noyau de la digue seront à surveiller ultérieurement.

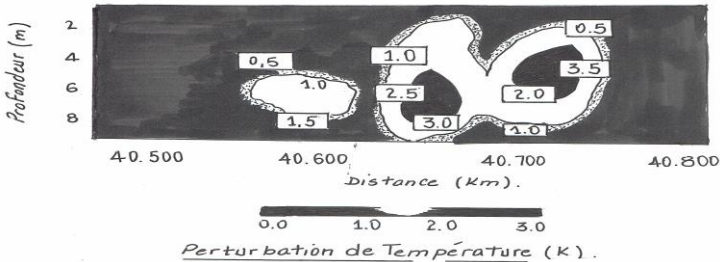


Figure 15 : Perturbation des températures

La figure 16 présente les températures dans une digue haute de 9m et comprenant un dispositif d'étanchéité. Par suite d'endommagements dans le dispositif d'étanchéité l'eau s'infiltrate à travers la digue en plusieurs endroits. Les mesures de température ont été appliquées pour localiser les différentes zones de fuites et pour déterminer la profondeur qui correspond à la vitesse maximale d'écoulement. La distribution des températures observées illustre remarquablement bien l'existence de fuites entre le km 2.45 et le km 2.54

(Heinrich, 2001). L'anomalie maximale se situe au km 2.50 à 3m de profondeur où la température atteint 3°C. Comme la température de l'eau de la retenue s'élevait à 2,8°C lors de la campagne thermométrique, il est évident que c'est à cet endroit que se produit l'écoulement le plus important à travers la digue. Pour empêcher l'évasion du matériau de la digue, qui mettrait en danger la stabilité de celle-ci, les fuites dans le dispositif d'étanchéité devraient être réparées ou pour le moins minutieusement surveillées pour détecter un changement éventuel de la vitesse d'écoulement.

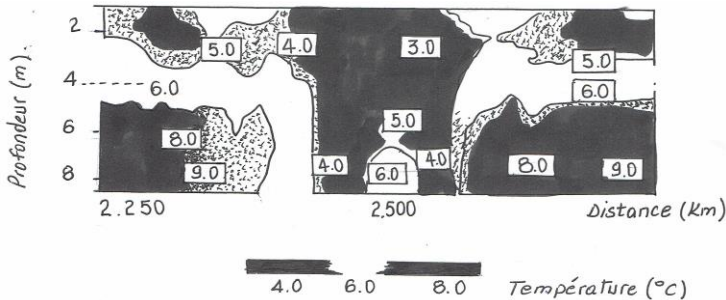


Figure 16 : Perturbation des températures

La figure 17 montre un exemple d'écoulement sous le remblai de la digue. Les mesures de température ont été relevées à la fin de l'automne quand la température des eaux de surface commençait à baisser. La température de l'eau était de 16°C lors de la campagne thermométrique. Les températures ont été mesurées tout le long d'un secteur de la digue considérée, sous le remblai de celle-ci. Par ce moyen on a pu facilement démontrer l'existence d'un écoulement important sous le remblai de la digue. Les températures exceptionnellement hautes dans le remblai de la digue sont engendrées par l'écoulement sous le remblai pendant les mois d'été lorsque la température de l'eau s'élevait à plus de 20°C. Aucune fuite n'a été détectée dans le dispositif d'étanchéité de surface. L'écoulement d'eau sous le remblai de la digue a pour seule origine l'absence d'un dispositif d'étanchéité en pied de digue. Il pourrait mettre en danger sa stabilité si l'érosion interne se déclenchait ou si des forces supplémentaires dues à des séismes s'établissaient. En conséquence, il est devenu indispensable de procéder à une estimation des risques mentionnés ci-dessus et de placer la digue sous une surveillance attentive (Heinrich, 2001).

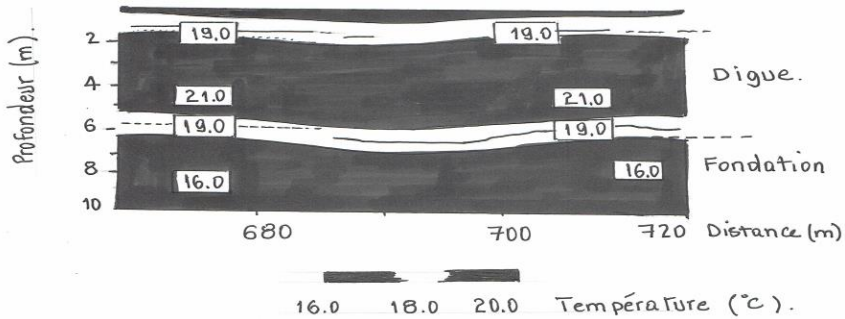


Figure 17 : Absence de fuite d'eau

ETUDE DES PARAMETRES PHYSICO CHIMIQUES

Les paramètres Physico-chimiques (PH, T°C, COND) nous renseignent sur l'origine de l'eau qui émerge aux sources et résurgences et aussi sur les différents types d'écoulements souterrains. Ces mesures nous permettent d'établir la relation entre les différentes masses d'eau. En effet, l'existence d'une stratification thermique au niveau du lac permet après la mesure des températures de résurgences, de remonter au niveau du lac auquel s'effectue l'écoulement. L'objectif de cette étude consiste à mesurer les paramètres physico-chimiques des différentes masses d'eau existantes au niveau du barrage afin de confirmer ou infirmer la connexion hydraulique entre ces masses d'eau et de déterminer les différents types d'écoulements au sein des piézomètres, ainsi que les niveaux et les terrains où l'écoulement s'effectue. Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé un conductimètre pour mesurer la conductivité et la température des différentes masses d'eau. Le prélèvement des échantillons d'eau a été réalisé par un préleveur (ANBT, 2003 ; Plata, 2002).

Mesure de conductivité et de la température

La mesure de la conductivité et de la température des différentes masses d'eau existantes dans la région, s'avère une nécessité. En effet, la conductivité renseigne sur l'origine de l'eau. Il est donc nécessaire de s'assurer que l'eau des résurgences provient bien de la retenue. Un problème de ce type a déjà été rencontré par l'un des pionniers de la discipline, l'Espagnol A. Plata Bedmar lors de son étude du lac Laja au Chili où l'eau resurgissait dans plus d'une cinquantaine de sources représentant environ 40% des fuites totales, une partie

de ces résurgences exhibent des conductivités proches de celles du lac (~ 42 $\mu\text{s}/\text{cm}$) alors qu'elles atteignaient dans d'autre 338 $\mu\text{s}/\text{cm}$ proche de celle de l'eau souterraine de la région (445 $\mu\text{s}/\text{cm}$), ceci voudrait dire que cette dernière contribue de façon calculable à l'eau de résurgence. Cette contribution pouvait donc être estimé simplement par [1.2.3] : $F_s \times K_s + F_l \times K_l = K_r$, avec $F_s + F_l = 1$; Ainsi $F_s \times K_s + (1 - F_s) \times K_l = K_r$; Où F_i et K_i sont respectivement les fractions et les conductivités des différentes masse d'eau. S , L et R sont respectivement pour : eau souterraine, lac et résurgence. La température, au cas de l'existence d'une thermique dans la retenue, permet d'établir une relation entre la température de l'eau des résurgences, des piézomètres et celle du lac, cette relation pourra indiquer à quelle profondeur de la retenue l'eau s'infiltré. Pour illustrer cela, nous donnons comme exemple le cas du barrage de Sabaneta en république Dominicaine, où une stratification thermique a été trouvée (ANBT, 2003 ; Plata, 2002). Sur la figure 18, nous représentons la forme du profil trouvé au niveau de ce barrage. Les profils verticaux de la conductivité, combiné à ceux de la température peuvent s'avérer décisifs, dans la localisation des niveaux et terrains où l'écoulement souterrain s'effectue. Ils nous permettent même de connaître les différents types d'écoulement au sein des piézomètres traversant les couches géologiques.

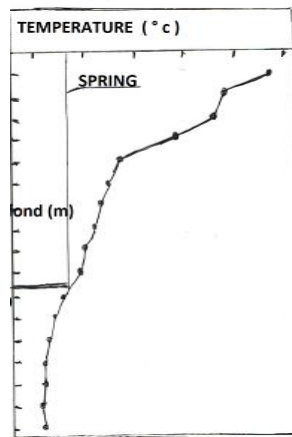


Figure 18 : Profil de la température au niveau de la retenue de Sabaneta, en République Dominicaine.

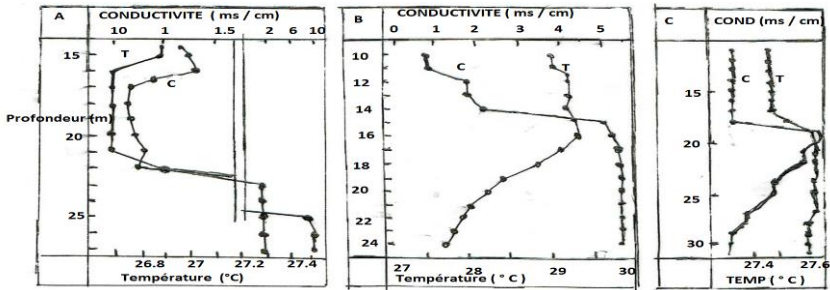


Figure 19 : Profils de la conductivité combinés à ceux de la température au niveau des piézomètres dans le barrage Maguara en République Dominicaine.

En effet, les portions constantes de conductivité et de température indiquent la présence d'un écoulement vertical au sein du piézomètre. Par ailleurs, si des valeurs de conductivité supérieures à celles des résurgences sont trouvées dans un ou plusieurs piézomètres, cela voudra dire que ces derniers ne captent pas les formations responsables des fuites, à moins de l'existence d'une eau souterraine de moindre conductivité dans le système. Cette dernière contribuera aux résurgences et baissera par la même leur minéralisation (ANBT, 2003 ; Plata, 2002). Les profils peuvent aussi montrer des portions profondes de la colonne d'eau de moindre salinité que celles plus superficielles, ce qui rend compte en fait d'un écoulement à partir de la retenue. En effet, si l'eau était stagnante dans le piézomètre, le gradient de concentration aurait eu le temps de disparaître et la salinité de s'homogénéiser sur toute la profondeur. C'est là où apparaît l'importance du profil de température. En effet, cette grandeur peut rentrer en compte car elle est capable de compenser les différences de densités, c'est-à-dire en fait que le profil de température devra la même allure que celui de la conductivité pour que l'on puisse confirmer l'hypothèse émise plus haut. Pour étayer cela, voici l'illustration sur la figure 19, trois cas concrets représentant des profils de conductivité et de température, relevés au niveau de piézomètres du barrage de Macagua au Nord-Ouest de la république Dominicaine. En effet, au niveau du cas A, la fraction constante du profil de basse conductivité et de température homogène comprise entre 17 et 21 m, dénote un écoulement horizontal provenant de la retenue. Au cas B, dans cet exemple un écoulement horizontal s'effectue dans les couches, situées entre 10 et 13 m. Il existerait également une strate imperméable entre 14 et 17 m. Au cas C, contrairement au cas A, bien que l'on observe une portion de profil de conductivité et de température constantes entre les niveaux 11 et 18 m, il existerait un flux vertical descendant (ANBT, 2003 ; Plata, 2002).

CONCLUSION

Les fuites d'eau au niveau des barrages est un problème très complexe surtout qu'il engendre des pertes considérables et menace la stabilité de ces ouvrages. L'étude de ce genre de problèmes s'avère très important et pour trouver des solutions adéquates il faut bien déterminer les couloirs de cheminements de ces fuites d'eau et les endroits défectueux. De ce fait, nous avons fait une synthèse des méthodes de détection de fuites, nous pouvons citer par exemple : la méthode des traceurs, la méthode du périmètre de fuites, l'essai de lugeons, la méthode géophysique, la méthode de la température, la méthode physico chimique, ect. Nous avons présenté aussi l'expérience de traçage au niveau des réservoirs et des piézomètres qui permettent de déterminer les zones d'infiltration au sein des réservoirs et les connexions probables entre les différentes masses d'eau. De plus elle confirme ou infirme l'existence des chemins de circulation d'eau entre la retenue et les résurgences. A titre d'information, ces méthodes font l'objet de nos recherches sur les fuites d'eau dans les barrages algériens fortement menacés par ce phénomène.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR B ; BENFETTA H. (2016). Actualisation et Amélioration de l'étude des fuites dans le barrage de Foum El Gherza. Article en cours de parution. 20 pages
Agence Nationale des barrages et des transferts (ANBT). (2003). Détection des fuites d'eau dans les retenues des barrages Alger. 50 pages.
- BENFETTA H. (2007). Etude de la Perte de capacité du Barrage de Ouizert. Thèse de Doctorat. Université des Science et de technologie (USTO). Oran. 200 pages.
- BOUDINA S. (2009). Les techniques de détection des fuites dans les Barrages et Réservoirs. Cas du barrage de Foum el Barrage Gherza. Rapport Interne d'AFRA-RAF du Projet/8/028. Agence Nationale des Barrages et Transferts Alger. 50 pages
- HEINRICH W. (2001). Détection des fuites d'eau par la méthode des températures. Edition La Documentation Française. France. 10 pages.
- MAURICE C. (1980). Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols. Editions Eyrolles Paris.
- PLATA BEDMAR A; ARAGUAS ARAGUAS L. (2002). Détection et la Prévention des Fuites des Barrages. Utilisation de traceurs artificiels en Hydrologie. Éditions CRC Presse. Espagne et Vienne. 436 pages.
- 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.