



LE BARRAGE RESERVOIR D'ERRAGUENE (ALGERIE) : UNE EXPERIENCE DE PLUS D'UN DEMI-SIECLE DANS LE SOUTIRAGE DES COURANTS DE DENSITE

THE ERRAGUENE RESERVOIR DAM (ALGERIA): AN EXPERIENCE OF MORE THAN A HALF-CENTURY IN THE EXTRACTION OF CURRENT DENSITY

REMINI B.¹, OUIDIR K.²

¹ Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie,
Université Blida 1, Blida 9000, Algérie

² Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, Bejaia
6000, Algérie

reminib@yahoo.fr

RESUME

Nous traitons dans cet article le soutirage des courants de densité par les pertuis de vidange du barrage d'Erraguene ; une technique qui se pratique depuis 1962 ; date de mise en eau du barrage. L'étude basée sur les données des levés bathymétriques (1974 et 1994) et les données des débits et des concentrations des mixtures soutirées, le barrage a atteint un comblement de 14% de la capacité totale en 2014. Grace aux soutirages des courants de densité, un volume de 10,7 millions de m³ de vase a été évacué durant la période : 1962-2010. Le rendement de soutirage le plus élevé égal à 47% a été atteint durant la période : 1994-2004, ce qui a doublé la durée de vie du barrage.

Mots clés : Barrage Erraguene, Envasement, Soutirage, Courants de densité.

ABSTRACT

In this paper, we treat the discharge of density currents by the flushing outlets of the Erraguene Dam. A technique that has been practiced since 1962; date of impoundment of the dam. The study is based on bathymetric survey data, liquid flow data and concentrations of the extracted mixtures. The dam reached a

siltation rate of 14% of the total capacity in 2014. Thanks to the withdrawal of the density currents, a volume of 10.7 million m³ of silt was evacuated during the period: 1962-2010. The drawdown yield reached the highest value equal to 47% during the period 1994-2004. The life of the dam has doubled.

Key words: Erraguene Dam, Siltation, Filling, Density Currents.

INTRODUCTION

Les crues remplissent les barrages réservoirs par les apports liquides. En contrepartie, elles drainent aussi des apports solides qui se déposent au fond des barrages. Au cours des années d'exploitation, la capacité d'eau ces barrages diminue jusqu'à ce qu'elle sera occupé totalement par la boue. Les barrages s'ensavent beaucoup plus vite dans les régions arides à cause d'une année hydrologique particulière caractérisée par une longue saison sèche et une saison humide caractérisée par de courtes crues mais dangereuses. Des bassins versants dégradés qui laissent les particules du sol s'écharpent grâce aux ruissellements : c'est l'érosion hydraulique considéré comme un paramètre de la désertification. Les milieux secs sont très vulnérables au phénomène de l'érosion qui s'est accéléré avec les changements climatiques. Une étude effectuée sur 30 bassins versants du nord Algérien a montré que l'érosion spécifique varie entre 30 et 3350 t/km².an (Mekerta et Tisot, 1990). Cependant, le taux d'érosion peut atteindre 4000 t/km².an sur la chaîne du côtier de Dahra (Demmak, 1982). Dans la même région du Maghreb, le taux d'érosion des bassins versant du Maroc varie de 100 à 5900 t/km².an (Lahlou, 1988). Dans une autre région aride de l'Asie, le taux d'érosion dépasse 2500 t/km².an sur certains bassins de la Chine et de l'île de Java en Inde (Mechin, 1980). En contrepartie, dans les régions humides, l'érosion spécifique est beaucoup plus faible et ne peut dépasser des centaines de tonne/km².an. A titre d'exemple, le taux d'érosion des bassins versants de la Roumanie ne peut dépasser 500 t/km².an (Radoane et Radoane, 2005). Il atteint par contre 62 t/km².an sur le bassin de la Seine, et 1500 t/km².an sur le bassin de la Durance (France) (Mechin, 1980). En périodes de crues, ces quantités de boue sont transportés par les oueds jusqu'aux barrages dont la concentration peut varier de 50 à 150 g/l avec des valeurs maximales dépassant même 500 à 600 g/l, puisque des valeurs de 650 g/l ont été enregistrées sur certaines rivières (Mekerta et Tisot, 1990). De telles valeurs déclenchent les courants de densité à l'entrée du lac qui se propagent sur le fond du lac jusqu'au pied du barrage pour déposer ces particules au fond de la retenue. Dans le présent article nous traitons l'évolution de l'envasement du barrage d'Erraguene

ainsi que l'efficacité des soutirages des courants de densité par les vannettes de dévasement.

REGION D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES

Situation et caractéristiques du barrage d'Erraguene

Destiné à la production de l'énergie électrique, le barrage d'Erraguene est un barrage en béton multivoutes, de capacité initiale évaluée à 202 millions de m^3 (fig. 1, 2, 3 et 4). En 2014, le barrage est destiné à l'irrigation. Il est situé dans la wilaya de Jijel à environ 350 km à l'Est d'Alger (fig. 5). Il a été mis en exploitation le mois de janvier 1962. Il est réalisé à l'exutoire d'un bassin versant d'une superficie de 652 km^2 , recouvert d'une végétation plus ou moins dense. La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée dans la région est de 1500 mm. L'apport annuel au barrage est de 110 millions de m^3 . La capacité de régularisation compte tenu d'une certaine réserve de charge pour les groupes de l'usine peut être prise égale à 240 millions de m^3 .

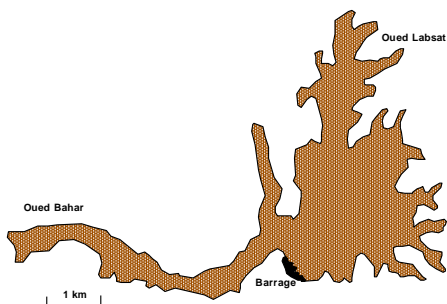


Figure 1 : Forme de la cuvette du barrage



Figure 2 : Une vue de la cuvette du barrage d'Erraguene de la Branche Oued Labsat (Photo. Ouidir, 2011)

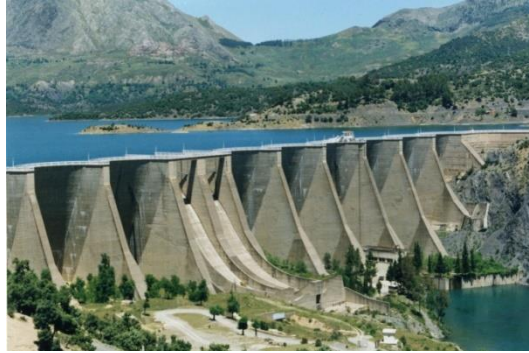


Figure 3 : Aval du barrage d'Erraguene (photo. Ouidir, 2011)



Figure 4 : Amont du barrage d'Erraguene (photo. Ouidir, 2011)

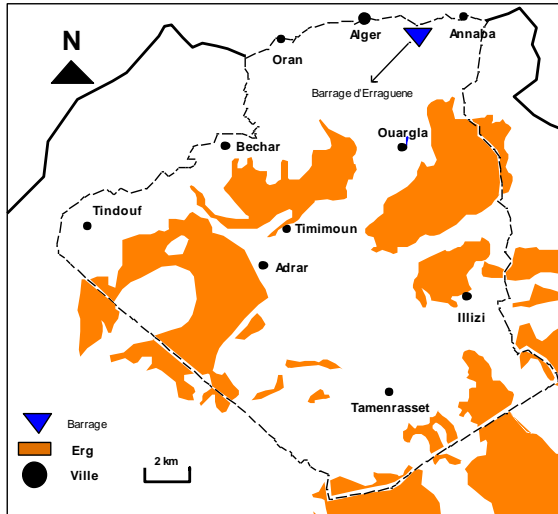


Figure 5 : Situation géographique du barrage d'Erraguene (Remini, 2017)

Batterie de vannettes de dévasement

Le barrage d'Erraguene est parmi les 4 barrages équipés par des vannettes de dévasement dans le monde. A savoir, les barrages d'Ighil Emda, Oued Fodda et Nabeur (Tunisie). Un système approprié composé de 4 vannettes de dévasement de 40 cm de diamètre, et de 2 vannes de dégrèvement de 2,75x1,80 m (fig. 6) est utilisé pour l'évacuation des courants de densité.

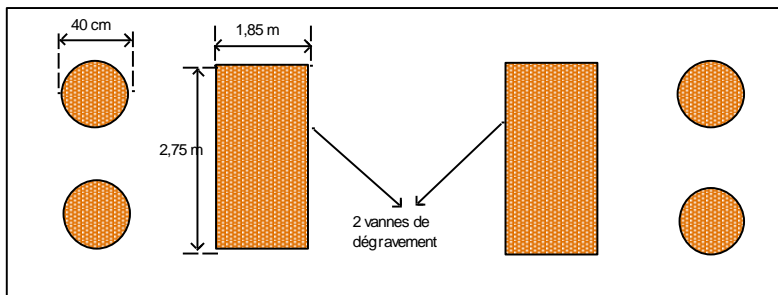


Figure 6 : Batterie de vannettes du barrage d'Erraguene (Données Sonelgaz. Schéma Remini, 2017)

Données utilisées

Les données que nous avons utilisées dans cette étude ont été collectées au niveau de la Sonelgaz de Derguiana et au niveau du barrage d'Erraguene. Il s'agit des levés bathymétriques exécutés dans la retenue en 1974 et en 1994. Les données annuelles des débits solide et liquide à l'entrée de la retenue ainsi que les données des soutirages (débits évacués et les densités de la suspension) durant la période : 1962 -2010.

Méthodologie de travail

Les services du barrage ont mis à notre disposition toutes les données depuis 1962 à 2010. Durant la première étape qui a pris beaucoup de temps, nous avons consulté et de traiter des centaines de fiches de soutirages qui sont archivés dans les bureaux de l'usine de Derguina (Béjaia) ou du barrage d'Erraguene (Jijel). Toutes les valeurs des débits de la suspension et leurs densités sont mentionnées sur ces fiches. Les valeurs ont été inscrites par des techniciens lors des mesures. Dans la deuxième étape, les valeurs retenues après vérification sont enregistrés dans des fichiers Excel. Dans la dernière étape, on trace les différents graphes.

Calcul des volumes de vase soutirés

Connaissant la masse volumique moyenne de la vase du barrage d'Erraguene égale à 1600 kg/m^3 , la suspension évacuée (mesurée) et sa densité (mesurée), le volume de vase pure soutirée peut être calculé. Sachant que le volume de la suspension est W_m : le volume de vase pure est W_v et le volume d'eau pure est W_e , tel que : $W_m = W_e + W_v$

Nous pouvons écrire aussi que: $\rho_e \cdot W_e + \rho_v \cdot W_v = \rho_m \cdot W_m$

Avec ρ_m : densité de la suspension

ρ_e : densité de l'eau

ρ_v : densité de la vase

Dans ce cas, la relation de calcul est On peut aussi retirer la relation:

$$W_v = W_m \cdot (\rho_m - 1) / 0,6$$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Mécanisme des courants de turbidité

Dans les régions arides, les crues sont chargées de particules fines et plus particulièrement celles d'automne arrivent dans une retenue qui présente une forme géométrique de type « canal ». Le contact entre l'eau chargée de densité supérieure à 1 avec celle des eaux calmes du lac (densité =1), provoque la formation d'un courant de turbidité bien individualisé qui se propage sans dilution sur le fond du lit de la retenue jusqu'à ce qu'il atteigne le pied du barrage. En l'absence de soutirage, l'onde du courant de densité butte contre la digue et tend à revenir dans le sens inverse. Une fois l'onde s'est stabilisées, les particules fines en quantité élevée se décantent et se tassent. On parle d'un envasement accéléré. Si les vannes de fond sont ouvertes au moment de l'arrivée du courant de densité, une quantité importante de sédiments sera soutirée (fig. 7) (Remini, 2015a ; Remini, 2015b).

Le barrage réservoir d'Erraguene (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité

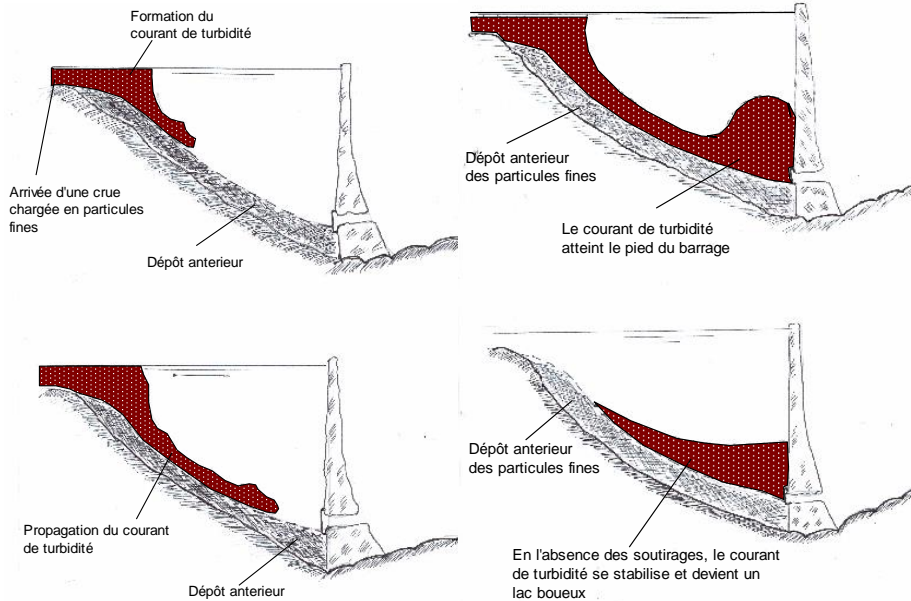


Figure 7 : Schéma de la propagation des courants de densité (Schéma Remini, 2017)

Les courants de densité dans le lac du barrage d'Erraguene

Avec des densités de 1.025 et plus les courants de densité se forment et se propagent dans l'oued Bahar. La forme géométrique de l'oued Bahar est très favorable à la propagation des courants de densité même avec de faibles densités. L'oued est un canal d'une longueur de 4 km et d'une largeur moyenne de 200m ; une forme idéale qui favorise la propagation des courants de turbidité du point de plongée jusqu'au pied du barrage. Par contre, dans la branche de l'oued Labsat d'une longueur de 4 km de forme lac, les courants de turbidité après un parcours de 2.5 km et d'une largeur moyenne de 300 m se diluent au centre de la retenue d'un largeur de 2 km. Très peu de courants de turbidité arrivent au pied du barrage (fig.8)

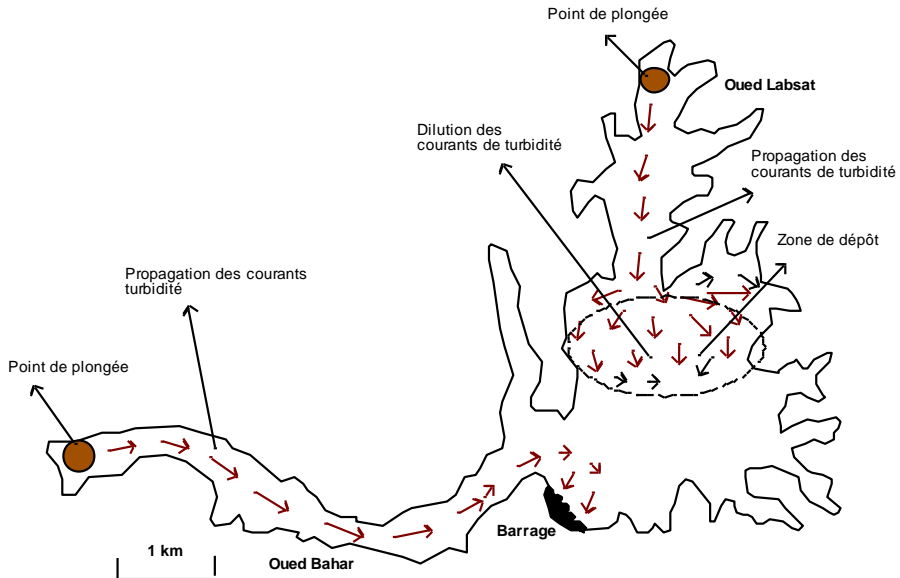


Figure 8 : Propagation des courants de turbidité dans la retenue du barrage d'Erraguene (Schéma Remini, 2017)

Envasement de la retenue

Sur la base des deux levés bathymétriques effectués sur la retenue en 1974 et en 1994, le taux d'envasement n'a pas dépassé la valeur de 1 millions de m^3 /an. Le levé bathymétrique effectué en 1974 a donné un volume de vase de 7,7 millions de m^3 qui s'est déposé dans la retenue en 12 ans (1962-1974), soit un taux d'envasement de 0,6 millions de m^3 /an. Le levé bathymétrique de 1994 a révélé un volume de vase déposé de 17,7 millions de m^3 , soit un volume de 10 millions de m^3 de vase déposé entre 1974 et 1994. Ceci a donné un taux d'envasement de 0,5 millions de m^3 /an. La figure 9 qui représente le diagramme des capacités (eau et vase) du barrage d'Erraguene, montre bien l'évolution des volumes d'eau et de la vase suivant la hauteur d'eau pour les deux périodes d'exploitation : 1962-1974 et 1962-1994. Il est intéressant de constater que la capacité d'eau du barrage a diminué de 201,7 millions de m^3 en 1962 (capacité initiale) à 194 millions de m^3 en 1974 et à 184 millions de m^3 en 1994.

Le barrage réservoir d'Erraguene (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité

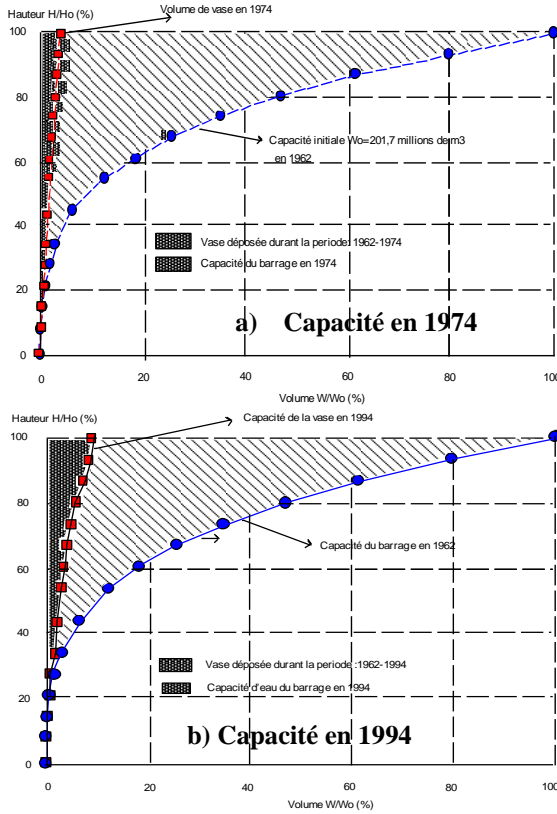


Figure 9 : Diagramme des capacités du barrage d'Erraguene (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Classement du barrage d'Erraguene vis-à-vis de l'envasement

Le phénomène de l'envasement du barrage d'Erraguene est original. Le barrage est caractérisé par un envasement faible et la présence des courants de densité dans le lac et plus particulièrement dans la branche Bahar. En partant des données des deux levés effectués en 1974 et en 1994, la vitesse de comblement n'a pas subi de grande variation. Elle est de 0,3%/an durant la période : 1962-1974 et de 0,25 %/an durant la période : 1974-1994. Elle est largement inférieure à 1%/an, ce qui classe le barrage d'Erraguene comme à faible taux d'envasement (Hallouche, 2007 ; Remini et Hallouche, 2005). Le taux de comblement du lac en 1994 est de 9% (inférieure à 10%). A ce titre, nous pouvons dire que le barrage Erraguene n'est pas menacé par l'envasement et peut être classé comme barrage à faible envasement. Nous estimons un

envasement de 28 millions de m³ en 2014 sur la base de ce taux d'envasement. Soit un taux de comblement de 14% de la capacité initiale du barrage.

Evolution de l'envasement dans le réservoir du barrage d'Erraguene

Délimitation de la retenue en trois parties

Il serait intéressant d'étudier l'évolution de l'envasement par zones dans la cuvette du barrage d'Erraguene. La cuvette d'un barrage peut être délimitée en 3 parties (fig. 10) (Remini, 1997) : La basse désignée par la zone 1, la centrale par la zone 2 et la partie haute par la zone 3. Chacune de ces parties a ces propres caractéristiques. Dans la partie basse, on assiste à des dépôts des sédiments ramenés par les courants de densité et aussi aux remaniements de la vase suite aux manœuvres des vannettes de dévasement. C'est une zone très perturbée par l'arrivée des courants et les soutirages. Dans ce cas, l'évolution du toit de vase devient compliquée et qu'elle ne suit aucune loi. Mêmes constatations peuvent être tirées de la zone 3 sauf que les perturbations du toit de vase sont provoquées par les variations du plan d'eau à l'arrivée des crues. Cette zone est le lieu de la plongée des courants de densité avec les dépôts de particules fines qui découlent de la formation des courants de densité. Elle marque aussi le terminus du charriage ; les crues font leurs dépôts de particules grossières dans la partie haute du barrage. La partie centrale se trouve à l'abri de toutes ces perturbations qui se manifestent dans les zones 1 et 3.

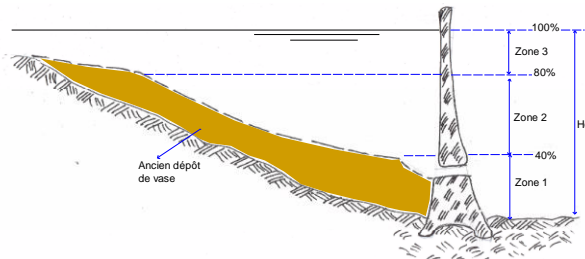
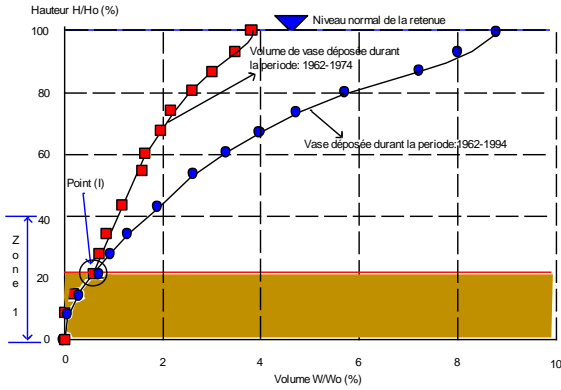


Figure 10 : Délimitation de la retenue en trois parties (Schéma Remini, 2017)

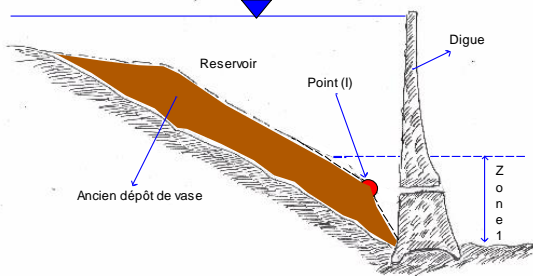
Evolution de l'envasement dans la partie basse

Il est quasiment impossible de suivre l'évolution du toit de vase dans la partie basse du barrage d'Erraguene, puisqu'elle est reliée directement au mode d'exploitation des pertuis de vidange du barrage. Lors des crues, la zone 1 est soumise aux dépôts de particules drainées par les courants de densité ou à l'érosion des anciens dépôts. Selon la pratique des soutirages des courants de

densité, nous assistons soit au dépôt des sédiments, soit à l'érosion des dépôts consolidés. Pour suivre l'évolution du toit de la boue dans la zone 1, il est indispensable d'avoir 3 levés bathymétriques pour suivre le point d'intersection des courbes de l'envasement (Remini, 1997). Or pour le barrage d'Erraguene, deux levés bathymétriques ont été effectués durant son exploitation, soit en 1974 et en 1994. Donc nous avons uniquement déterminé la hauteur de la vase dans la zone 1 en 1994. Désigné par la lettre (I), le point d'intersection entre les deux courbes d'envasement est situé à 22% de la hauteur H_0 à partir du fond, soit une hauteur de vase égale à 17 m durant la période 1974-1994 (fig.11 (a et b)). C'est grâce aux soutirages des courants de densité que le toit de vase a évolué lentement.



a) Evolution de la vase suivant la profondeur du lac



b) Schéma du point (I)

Figure 11 : Evolution des dépôts vaseux dans la partie basse du barrage d'Erraguene (Schéma Remini, 2017)

Evolution de l'envasement dans la partie centrale

La partie centrale est loin des perturbations provoquées par les manœuvres des vannettes de dévasement dans la zone 1 et les perturbations du plan d'eau à l'arrivée des crues. La vase engendré par l'évanouissement des courants de densité de faible concentration se dépose sans être perturbée. Dans ce cas, l'évolution du toit suit en principe une relation spatio-temporelle.

La figure 12 représente l'évolution de l'envasement dans la partie centrale pour les périodes : 1962-1974, 1962- 1994. Il est intéressant de constater que pour ces deux périodes, la relation est linéaire. Ce qui veut dire que le toit de vase évolue parallèlement au fond du lac.

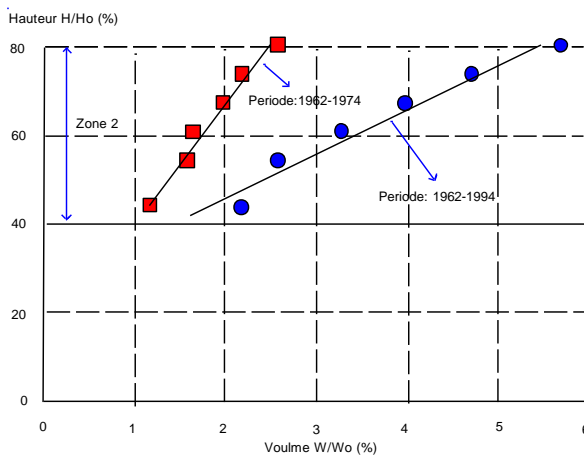


Figure 12 : Evolution des dépôts vaseux dans la partie centrale du barrage d'Erraguene (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Evolution de l'envasement dans la partie haute

C'est comme la zone 1, il est impossible de suivre l'évolution du toit de vase dans la partie haute du barrage à cause des variations du plan d'eau et les conséquences provoquées par le freinage des crues à l'entrée du lac. Il s'agit de la plongée des courants de densité et tout ce qu'elle peut apporter sur le dépôt de particules fines. Les particules grossières charriées par les crues font leur arrêt au niveau de cette zone 3. Délimitée entre les cotes 80 et 100% est la première zone qui se comble dans le processus de l'envasement d'un barrage (Remini, 1997). En plus le comblement de la zone centrale s'étend vers la zone 1. Nous avons représenté sur la figure 13, l'évolution de l'envasement dans la partie haute du barrage d'Erraguene. Il est intéressant de constater que durant la

période 1962-1974, 1989, les dépôts évoluent linéairement avec la même pente suivant les deux zones 1 et 2. Ceci peut être expliqué par le faible dépôt des sédiments sur tout le lac. Par Contre, durant la période 1962-1994, les dépôts de vase sont beaucoup plus importants sur l'ensemble de la cuvette. L'évolution des dépôts vaseux dans la zone 3 se caractérisent par une évolution linéaire mais avec deux pentes différentes. Le dépôt ase évolue en deux donc occupe l'eau et la surface du lac se rétrécit petit à petit.

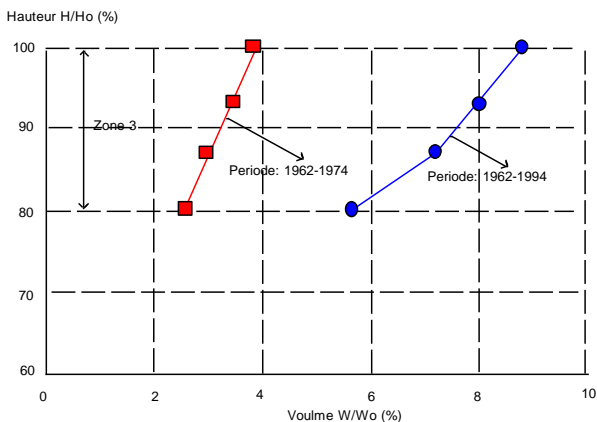


Figure 13 : Evolution des dépôts vaseux dans la partie haute du barrage d'Erraguene (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage des courants de densité

Faute d'absences de données, deux périodes d'exploitations : 1967-1984 et 1991-2010 du barrage d'Erraguene ont fait l'objet de cette étude. Durant la première partie qui a duré 20 années d'exploitation (1964-1984), une quantité de vase évaluée à 5.6 millions de m^3 a été soutirée et qui a nécessité un volume d'eau claire de 80 millions de m^3 . Par contre durant la deuxième étape (1991-2010), il fallait 60 millions de m^3 d'eau pour évacuer 2.4 millions de m^3 de vase. Comme le montre la figure 14 (a et b), il fallait 10 m^3 d'eau en moyenne pour soutirer 1 m^3 de vase durant la période : 1967-1981 et 35 m^3 en moyenne pour évacuer 1 m^3 de vase durant la période : 1991-2010. La plus forte quantité de vase soutirée a été évaluée à 1,18.millions de m^3 en 1969 et 0,05 millions de m^3 en 1979 comme la plus faible. L'année 1994 a été marquée par la plus grande quantité de vase soutirée, il s'agit de 0.7 millions de m^3 . De fait, la quantité de vase soutirée varie considérablement d'une année à l'autre (fig. 15(a et b)). Ce sont les crues qui déclenchent les courants de densité. Donc il y a une relation entre les apports d'eau au barrage et les quantités de vase soutirées.

Les apports d'eau sont variables d'une année à l'autre avec un pic de plus de 270 millions de m³ en 1973 (fig. 16(a et b)). Malgré un volume de vase évacué égale à 5.6 millions de m³, il y a un décalage entre les apports et les quantités soutirées durant la période : 1964-1984 (fig.15a et 16a). Par contre, durant la période : 1991-2004, les quantités soutirées sont en concordance avec les apports d'eau (fig. 15b et 16b). Les relations apports d'eau – vase soutirées confirment cette dépendance (fig. 17 (a et b)).

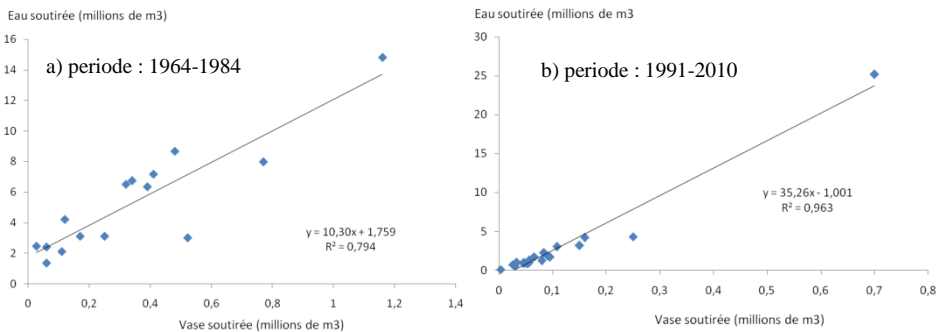


Figure 14 : Relation : Eau – Vase durant les soutirages des courants De densité (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

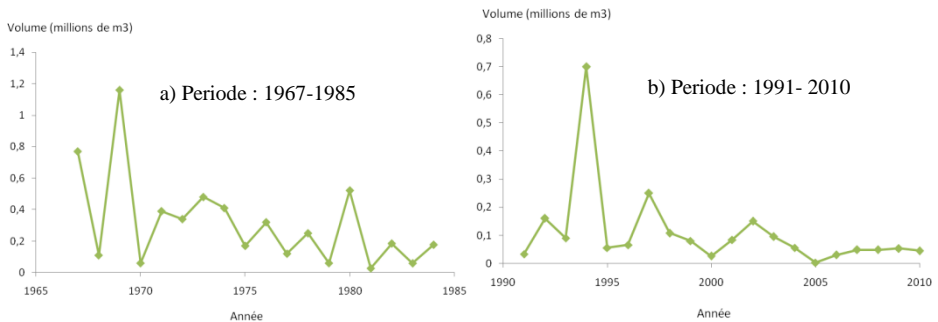


Figure 15 : Quantités annuelles de vase soutirées par les vannettes de dévasement (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Le barrage réservoir d'Erraguene (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité

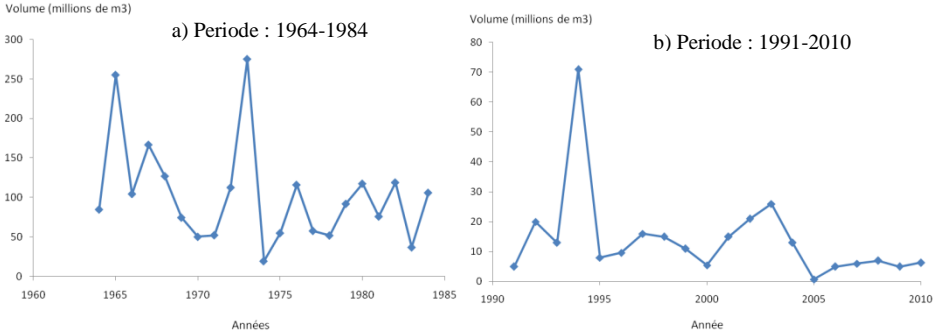


Figure 16 : Apports liquides annuels au barrage durant la période : 1964-1985 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

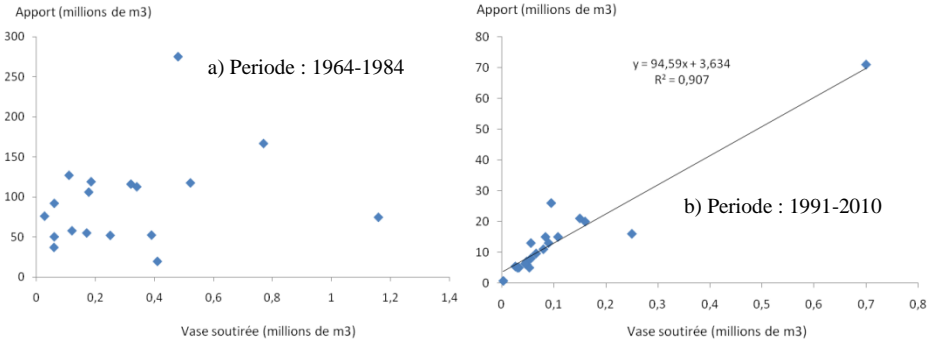


Figure 17 : Relation Apport liquides/ Vase soutirée (periode :1991-2010) (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Mécanisme et fonctionnement des soutirages des courants de densité

La présence des courants de densité dans un barrage peut être un avantage comme il peut être un inconvénient pour la durée de vie de l’ouvrage. Tout dépend de la maîtrise des soutirages des courants de densité. L’objectif est d’évacuer le maximum de matériaux avec un minimum d’eau claire. Pour atteindre un tel objectif, il faut garder un écoulement permanent de la suspension par les pertuis de vidange. A cet effet, il faut que le courant de densité qui se propage sur le fond du barrage puisse continuer son parcours au-delà des orifices de dévasement. Dans ce cas, la maîtrise des manœuvres des pertuis de vidange est nécessaire. On doit régler les ouvertures et de fermetures de vannes de fond au moment de l’approche du courant de densité du pied du barrage pour obtenir un écoulement permanent du courant de densité à travers les vannettes de dévasement. Ceci se traduit par une stabilité de la densité de la suspension au moment de soutirage (fig. 18).

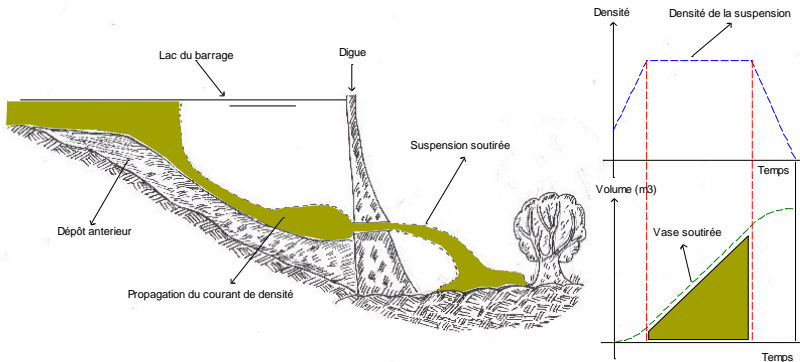


Figure 18 : Schéma synoptique d'un soutirage parfait du courant de densité (Schéma Remini, 2017)

Par contre, les manœuvres des vannettes de dévasement (ou vannes de vidange) à l'avance ou en retard par rapport à l'arrivée du courant de densité au pied du barrage, provoquera soit, un excès de perte d'eau claire soit un dépôt de particules fines du freinage du courant de densité. Dans ce cas, on obtient une suspension presque plastique (fig. 19).

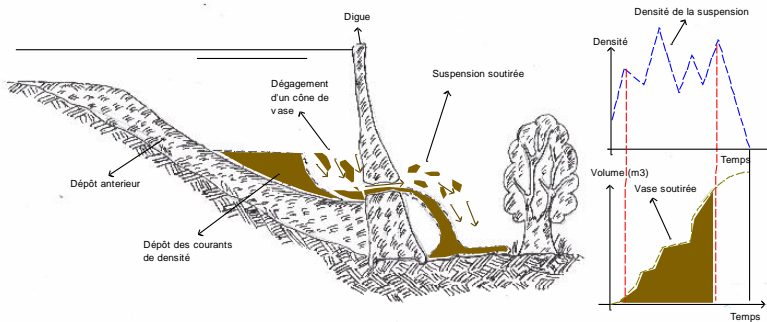


Figure 19 : Schéma synoptique d'un mauvais soutirage d'un courant de densité (Schéma Remini, 2017)

Densité de la suspension soustrée

Le courant de densité s'écoule grâce à la masse volumique de la suspension, il peut remonter même des contre pentes et de petits obstacles. La vitesse de propagation du courant de densité est fonction du facteur de pression. Lequel est défini comme étant le rapport entre la variation de la densité ($\Delta\rho = \rho_m - \rho$) et la densité de la suspension ($\Delta\rho/\rho_m = (\rho_m - \rho)/\rho_m$). Il est caractérisé comme la force motrice du courant de densité et comme paramètre principal du soutirage. Plus

$\Delta\rho/\rho_m$ est élevé, plus l'évacuation des sédiments sera importante et la perte d'eau sera faible, et il ne doit pas dépasser une valeur limite de la concentration qui dépend de la nature et de la granulométrie de la vase.

Nous avons représenté sur la figure 20, l'évolution du facteur de pression en fonction des concentrations enregistrées aux cous de différentes opérations de soutirage des courants de densité par les vannettes de dévasement durant la période : 1964-1984. Nous constatons que le facteur de pression $\Delta\rho/\rho_m$ évolue linéairement dans une première phase, à partir d'une valeur critique de la concentration, il y a ralentissement de ce facteur, la fonction prenant une forme parabolique. La densité critique de la suspension (ou la concentration) est $\rho_m = 1,070$ ($C = 11.5\%$). Nous pouvons dire que la valeur critique de la concentration correspondant à l'apparition de la rigidité initiale au changement rhéologique de la suspension. Ceci veut dire que la suspension passe d'un liquide Newtonien à un liquide non Newtonien. Nous devons soutirer Les courants de densité dont la masse volumique ne dépassant pas la valeur 1070 kg/m^3 .

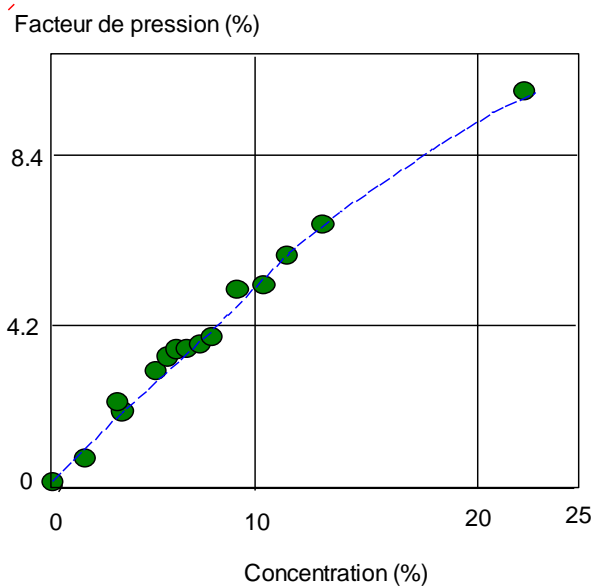


Figure 20 : Evolution du facteur de pression en fonction de la concentration de la suspension soutirée (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Quelques exemples de soutirages

Nous avons choisi quelques opérations de soutirages qui ont été effectuées durant la période d'exploitation du barrage entre 1962 et 2010.

Soutirage du 22 au 23 Avril 1970

Durant la crue du 22 au 23 Avril 1970, le soutirage du courant de densité a duré 20 heures sans interruption avec une densité de la mixture variant entre 1,033 et 1,040 (fig. 21). Les manœuvres des vannes ont été bien exécutées puisqu'en enregistrant à 13 heures une densité de 1,066 et durant 03 heures, la densité a été amenée à 1,04 pour qu'elle se stabilise ensuite entre 1,033 et 1,040 (fig. 21). Ce cas peut être expliqué par le fait que le courant de densité est arrivé bien avant 13 heures, ce qui a provoqué un remous de l'eau turbide devant les vannes. La chute de la densité de la suspension de 1,066 à 1,040 durant les trois premières heures de soutirages justifie l'existence d'un remous de courant de densité (fig. 22a). La stabilité (pratiquement) de la densité de la mixture justifie que l'écoulement du courant de densité est permanent ce qui a donné une évolution linéaire de la vase soustraie en fonction du temps (fig. 22b). Le volume de vase total évacué est égal 4,250 m³.

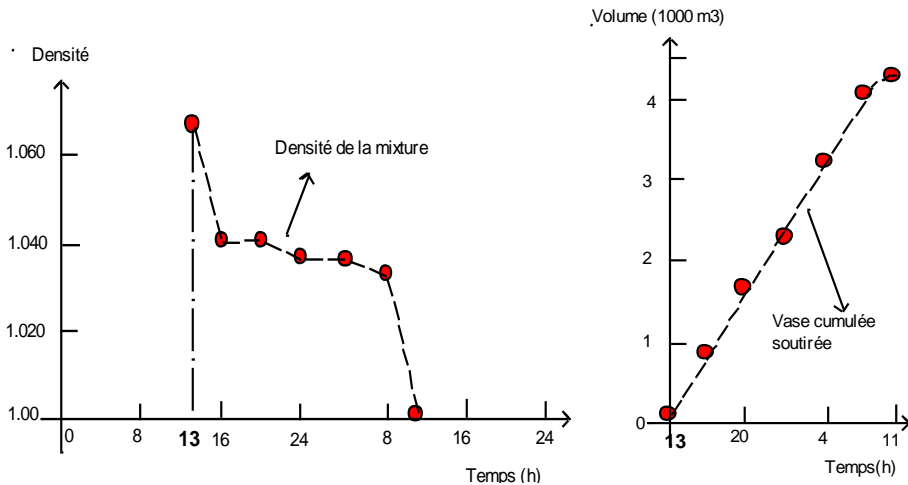


Figure 21 : Barrage Erraguene – Soutirage du 22 au 23 Avril 1970 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Le barrage réservoir d'Erraguene (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité

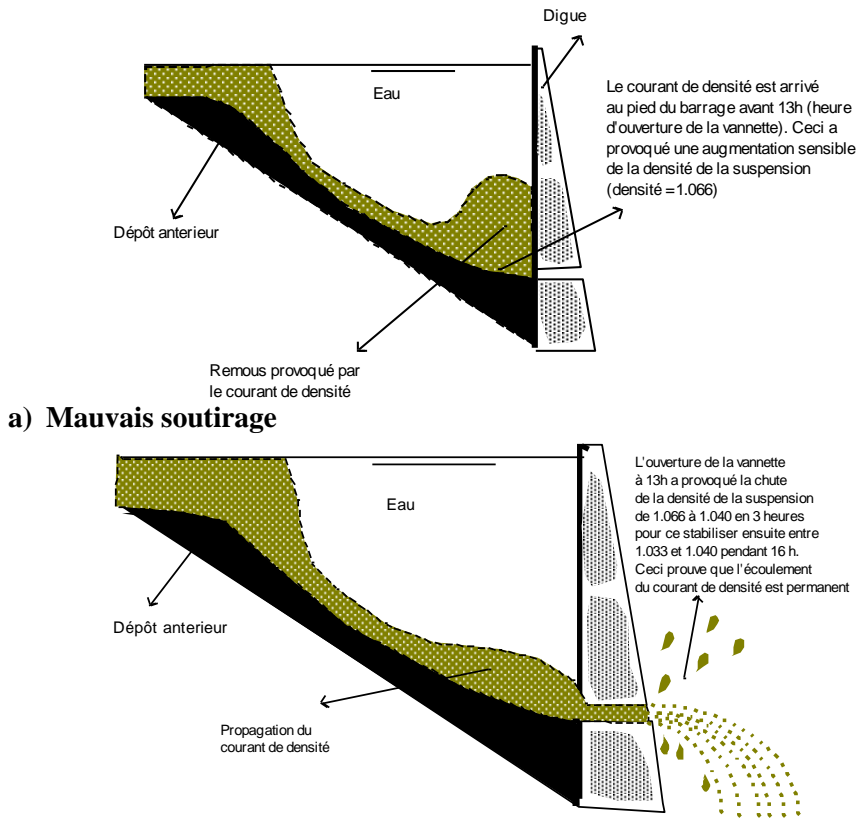
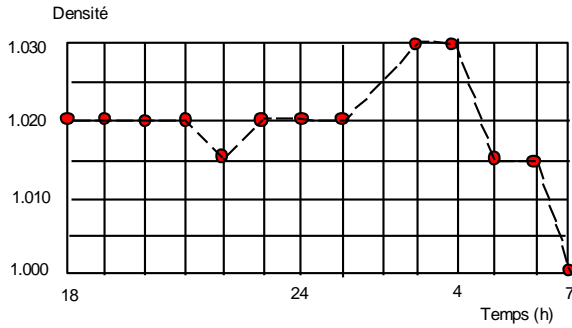


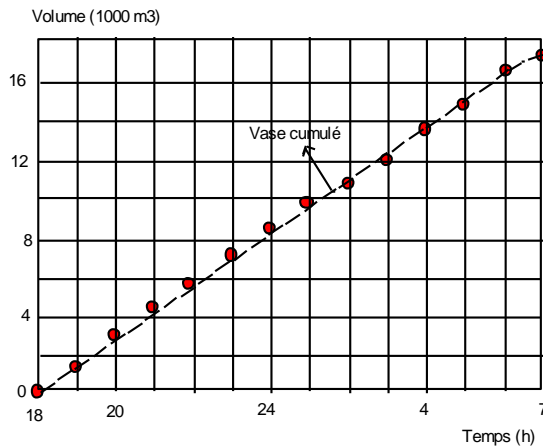
Figure 22 : Schéma d'un soutirage parfait du 22 au 23 Avril 1970 (Schéma Remini, 2017)

Soutirage du 21 au 22 Septembre 1981

Le soutirage a duré 13 heures, la densité de la mixture variant entre 1,02 et 1,03 durant plus de 10 heures et le volume de vase évacué égal à $16,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (fig. 23). Nous pouvons classer ce cas comme un soutirage parfait malgré une perte d'eau importante mais néanmoins, on évite la forte décantation pour cette densité.



a) Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage



b) Evolution de la vase soutirée

Figure 23 : Barrage Erraguene – Soutirage du 21 au 22 septembre 1981 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 24 au 25 Août 1981

L'opération du soutirage a duré environ 16 heures (soit du 24 août à 15 heures au 25 août à 7 heures), avec des densités de la suspension évacuée très variables dans le temps (presque chaque heure) allant de 1,020 à 1,040 (fig. 24), ce qui a pu favoriser le dépôt, et en même temps une perte d'eau considérable. Il en est résulté une variabilité de débit des sédiments, ce qui a conduit à une évolution non linéaire de la vase (cumulée) soutirée (fig. 24). Le volume de vase évacué est égal à 28.10^3 m^3 pour une quantité d'eau 5 à 6 fois supérieure.

Le barrage réservoir d'Erraguene (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité

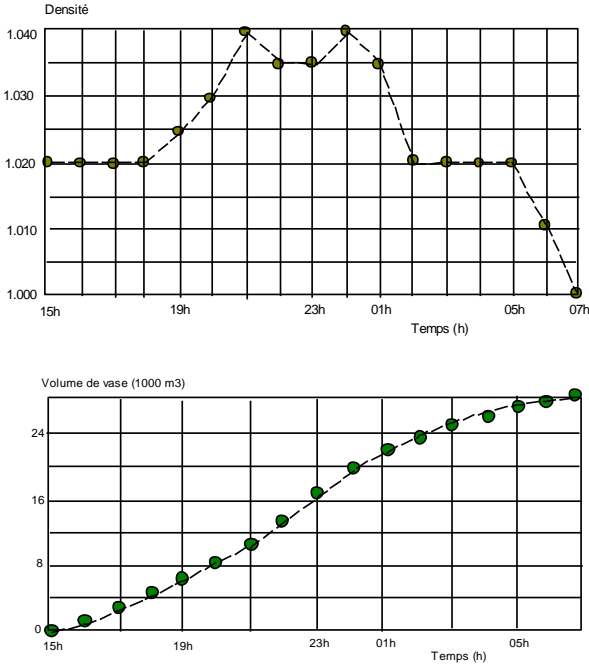


Figure 24 : Barrage Erraguene – Soutirage du 24 au 25 Août 1981 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 23 au 25 Décembre 1969

La crue du 23 au 25 Décembre 1969 a donné naissance à deux courants de densité. Le soutirage du premier a duré 16 heures à partir du 23 Décembre à 12 heures et qui a été mal exécuté puisque la densité de la mixture n'arrivait pas à se stabiliser, elle a baissé progressivement de 1,055 à 1, 000 (fig. 25). Les vannes ont été fermées le 24 décembre à 4 heures après avoir soutiré le courant de densité. Le même jour, la réouverture des vannes a eu lieu à 10 heures, c'est le deuxième soutirage et qui a duré 38 heures sans arrêt et cette fois-ci, la densité s'est stabilisée autour de 1,030 et 1,040 (fig. 26), ce qui a donné la forme linéaire de la fonction du volume de vase évacué. Avec à la fin, une quantité totale égale 40.10^3 m^3 pour une perte d'eau égale 944.10^3 m^3 soit un rapport de 4.24% (fig. 26). Notons que cette crue a ramené une quantité d'eau égale à $150.872.24 \text{ m}^3$ soit un rapport de 6% entre le volume évacué et le volume entré.

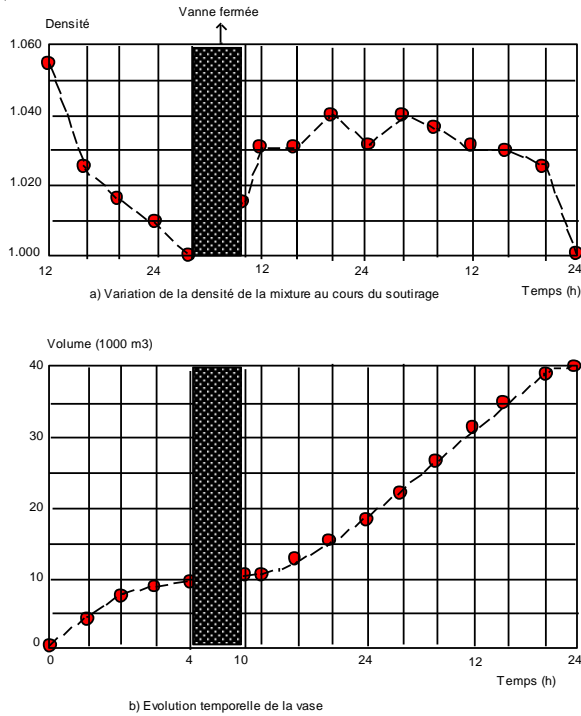
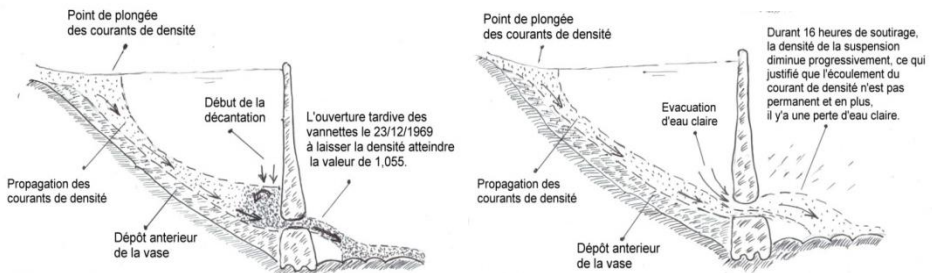


Figure 25 : Barrage Erraguene – Soutirage du 23 au 25 Décembre 1969 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)



Soutirage du 01 au 08 Décembre 1969

La crue a duré exactement 08 jours par contre, on assiste à trois soutirages : Le premier qui a été exécuté et a duré 72 heures sans interruption du 01 décembre à 16 h au 04 décembre à 16h. La densité de la mixture est restée dans l'intervalle

1,045 - 1,056 pendant plus de 52 heures (fig. 27), ce qui confirme que le soutirage a été bien exécuté. Le graphe du volume de vase cumulée en fonction du temps est une droite linéaire (fig. 27). Ce cas peut être considéré comme un soutirage parfait. Le courant de densité a été complètement épuisé le 4 décembre 1969 à 16 heures. Les vannes étant fermées, mais, on contrôle toujours la densité de l'eau. La réouverture de la vanne a eu lieu le 05 décembre à 10 heures. Le soutirage a duré environ 10 heures et la densité de la suspension n'a pas dépassée 1,025. Après trois jours de fermeture des vannes, une densité de 1,065 a été mesurée le 8 décembre à 8 heures. Aussitôt, la vanne a été ouverte et la densité a chuté en 4 heures pour atteindre 1,000. Nous pensons que ce dernier cas, peut être soit un courant de densité de faible intensité, soit à une érosion des derniers dépôts de vases dans la zone I non encore consolidés. Un volume total de vase égal à $18,4 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ a été évacué avec une proportion d'eau égale à 2,6. Millions m^3 . Soit un rapport de 7%. Un volume égal à 29 millions de m^3 d'eau a été apporté par la crue, soit un rapport de 1/10 entre l'eau perdue et l'apport.

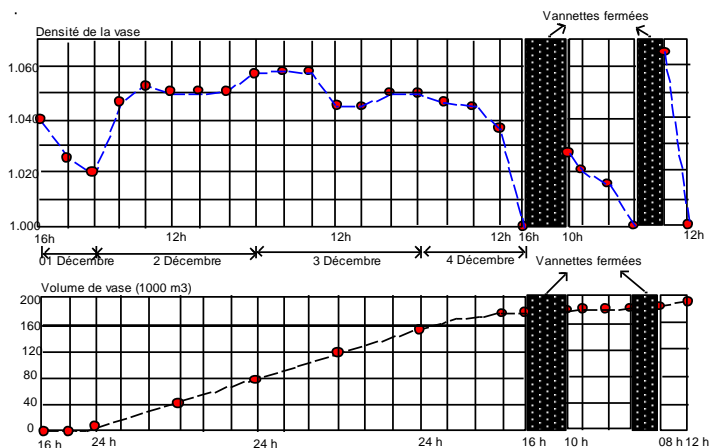


Figure 27 : Barrage Erraguene - Soutirage du 01 au 08 Décembre 1969 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 18 au 22 décembre 1980

La crue a duré du 18 au 23 décembre, par contre les opérations de soutirage ont été arrêtées le 22 décembre à 9 heures. Durant cette crue, 4 soutirages ont été effectués, ce qui prouve que l'alimentation en débit solide n'a pas été continue. Le premier soutirage a duré exactement 1 heure et demi (le 18 décembre de 12 heures à 1 heure 30 mn) avec une faible densité de mixture n'excédant pas

1,020. La réouverture de la vanne a eu le même jour à 19h30 le soutirage a duré 10 heures et demi avec une densité maximale égale à 1,040. Un autre courant de densité de faible concentration a été soutiré le 19 Décembre à 16 heures durant deux heures. Par contre, le dernier courant de densité a duré plus de 60 heures. Le soutirage a été plus au moins exécuté avec des densités de mixture variables durant les premiers 35 heures (fig. 28). Les derniers 24 heures, l'écoulement de la suspension à travers le pertuis était permanent vu que sa densité est restée presque constante (varie entre 1,040 et 1,050). Le volume total de vase évacué au cours de cette opération est évalué à 185.10^3 m^3 (fig. 28).

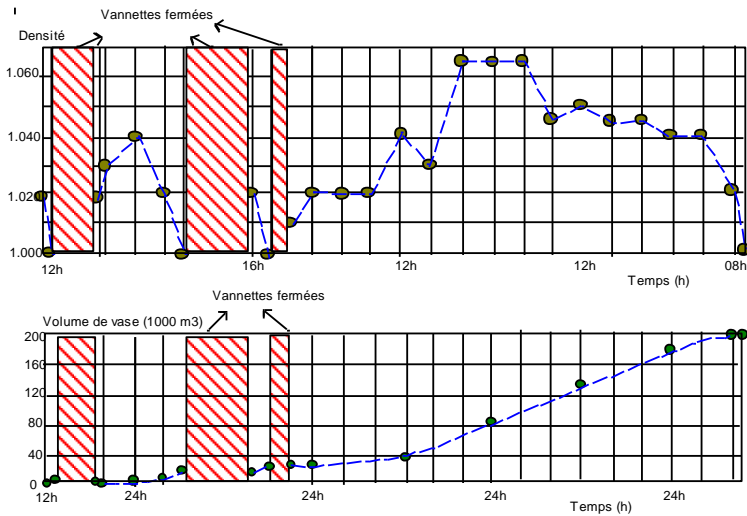


Figure 28 : Barrage d'Erraguene – Soutirage du 18 au 22 décembre 1980 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 01 au 06 octobre 1969

La violente crue survenue dans la retenue du 1 au 12 octobre 1969 a donné naissance à deux courants de densité de fortes concentrations. Le premier soutirage a commencé le 01 Octobre à 7h après avoir détecté une densité de 1,100. Aussitôt, les 04 vannettes ont été ouvertes, la densité de la mixture a chuté de 1,100 à 1,020 en une heure ce qui justifie que le courant est bien arrivé avant 7 heures et la décantation des particules fines a bien débuté. La fermeture des deux vannes a augmenté la densité jusqu'à 1,070 durant 4 heures, pour ensuite décroître progressivement jusqu'à 1,040 durant 16 heures (fig. 29). Le courant a été épuisé le 2 Octobre à 4 heures. Cette opération n'a pas été bien exécutée. Les vannes étaient fermées et le contrôle de densité de l'eau continu

jusqu'au 5 Octobre à 21 heures ou le même phénomène s'est répété, une densité de 1,100 a été enregistrée mais cette fois-ci on a ouvert seulement deux vannes pour voir la densité baisser de 1,100 à 1,040 pendant 5 heures et ensuite elle s'est stabilisée autour de 1,045 durant 16 heures. La fermeture des vannes a eu lieu le 6 Octobre à 20 heures, cette fois-ci l'opération a été réussie (fig. 29). Notons, qu'aucun autre courant n'a été détecté près des vannes malgré que la crue se soit arrêtée le 12 Octobre.

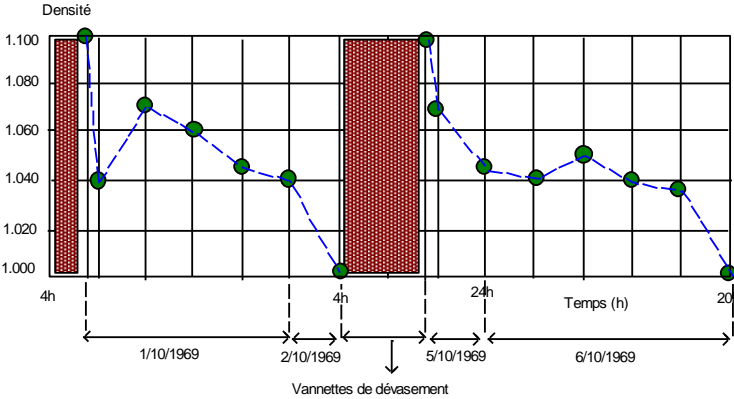


Figure 29 : Barrage d'Erraguene - Soutirage du 01 au 06 octobre 1969 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 2 au 5 Avril 1978

Le courant de densité est arrivé au pied du barrage le 2 Avril à 21 heures avec une densité de 1,015. Aussitôt, la vanne a été ouverte et le soutirage a duré environ 55 heures dont, 36 heures la densité a fluctué entre 1,04 et 1,055 (fig. 30), ce qui a enregistré un écoulement permanent de la lame turbide, nous pouvons dire que le courant de densité a été pratiquement évacué. Ce cas est un soutirage parfait.

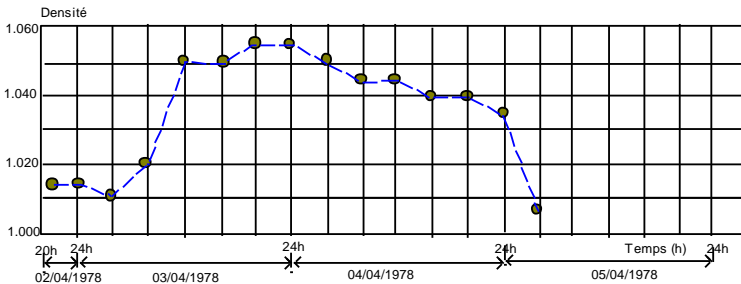


Figure 30 : Barrage d'Erraguene - Soutirage du 2 au 5 Avril 1978 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 25 au 28 Septembre 1973

La crue du 25 au 28 Septembre 1973 a donné naissance à un courant de densité qui a drainé des sédiments dont la concentration est élevée. L'ouverture des vannes a eu lieu le 25 Septembre à 6 heures après avoir détecté une densité de l'eau turbide égale à 1,030. le soutirage a duré plus de 76 heures durant lesquelles, la densité de la mixture est restée constante égale à 1,060 pendant 16 heures et 1,045 durant 28 heures (fig. 31) ce qui explique bien que les vannes ont été bien manœuvrées et le courant de densité a été bien soutiré. Ce cas peut être un soutirage parfait.

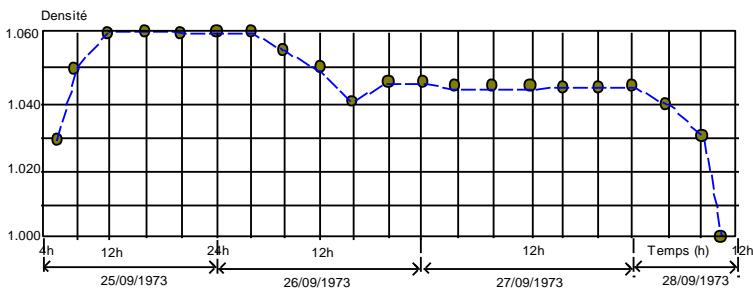


Figure 31 : Barrage d'Erraguene - Soutirage du 25 au 28 Septembre 1973 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

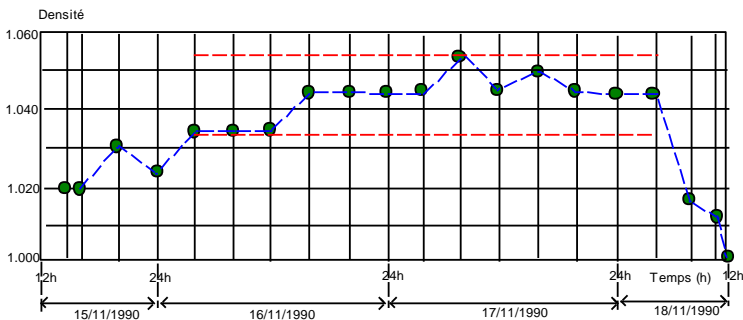


Figure 32 : Barrage d'Erraguene - Soutirage du 15 au 18 Novembre 1990 (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Soutirage du 15 au 18 Novembre 1990

Durant cette cure, le soutirage du courant de densité a duré 72 heures, sans interruption et durant plus de 48 heures, la mixture a gardé une densité variable entre 1,035 et 1,055 (fig. 32) qui est comprise dans la zone optimale de soutirage. L'écoulement de la couche turbide est presque permanent avec

évidemment absence de remous près des vannes. L'ensemble des sédiments drainés par ce courant ont été soutirés. Les manœuvres des vannes ont été bien exécutées d'où l'obtention d'un soutirage parfait.

Capacité sauvegardée par le soutirage des courants de turbidité

Le soutirage des courants de turbidité par les pertuis de vidange d'un conduit à l'évacuation d'un volume de vase appréciable. L'examen des résultats des soutirages obtenus sur le barrage d'Erraguene nous a permis d'apprécier les capacités sauvegardées. Le suivi des soutirages est mené d'une façon satisfaisante. Une quantité de vase évaluée à 10,7 millions de m³ a été évacuée en 48 années d'exploitation (1962-2010). Comme le montre la figure 33 une nette régression de l'envasement au cours du temps a été observée.

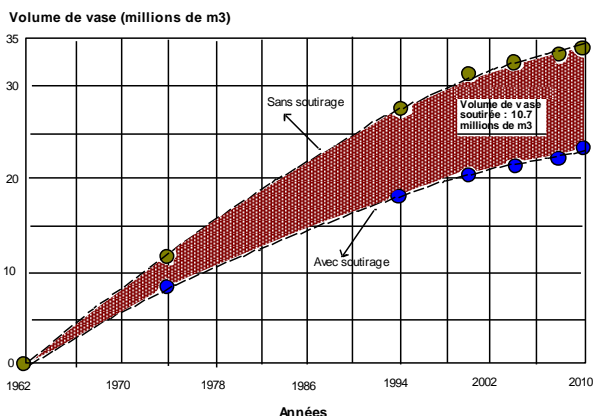


Figure 33 : Barrage d'Erraguene - Evolution temporelle de l'envasement avec et sans soutirage des courants de turbidité (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Rendement des soutirages des courants de turbidité

Le rendement des soutirages des courants de turbidité (S) le rapport entre le volume des sédiments évacués (W_{ss}) et le volume total des sédiments (W_{se}) entrant dans la retenue, soit : $S=W_{ss}/W_{se}$. Nous avons évalué le rendement du soutirage en deux périodes, soit 1962-1974 et 1974-1992 (fig. 34).

- Pendant la période 1962-1974, une quantité de vase égale à 4,4 millions de m³ sur 12 millions de m³ de vase entrant dans la retenue a été évacuée, soit un rendement de 36 %.
- Pendant la période 1974-1994, le rendement a atteint 29 % puisqu'une quantité de vase égale à 4,6 millions de m³ sur les 16 millions de m³

de vase drainée par les courants de densité dans la retenue a été évacuée.

- Pendant la période : 1994 -2004, le rendement a atteint 47%. Des soutirages ont été bien menés.
- Pendant la période : 2004 – 2010, le rendement a chuté pour atteindre 21%.

Ainsi, pendant la période globale 1962-2010 environ 10.7 millions de m³ de vase ont été évacués, alors que 34 millions de m³ se décantent dans la retenue, soit un rendement moyen de 31 %.

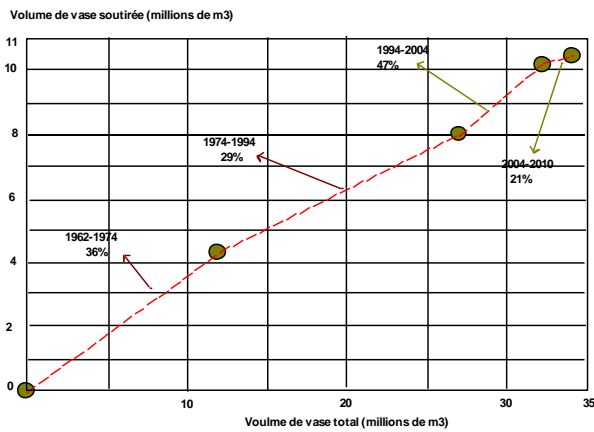


Figure 34 : Barrage d’Erraguene - Rendement des soutirages (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Variation du débit de soutirage en fonction de la concentration en sédiments

Le débit de la suspension évacuée par les vannettes de dévasement est une fonction de la teneur en particules fines. Nous avons étudié l’effet de la concentration des sédiments sur le débit de la suspension soutirée par les pertuis de vidange du barrage d’Erraguene durant la période : 1962-1990. Le graphe adimensionnel de la figure 35 représentant le nombre adimensionnel F_t en fonction de la concentration (%) avec $F_t = Q_m^2 / (g \cdot H^5)$.

Nous constatons, que d’après la figure 21 qu’un nuage de points prend l’allure d’une hyperbole. Donc, plus on soutire la mixture avec des fortes concentrations plus le débit sera faible. En plus, la forte densité des points est comprise entre les concentrations 1 % et 10 %, ce qui est dû aux opérations de soutirages qui sont pratiquées généralement avec une gamme de densités de la mixture

comprise entre 1,020 et 1,060. Ce qui confirme que l'ensemble des opérations de soutirages ont été exécutées pour des densités de mélanges ne dépassant pas la densité du changement rhéologique de la suspension (1,070).

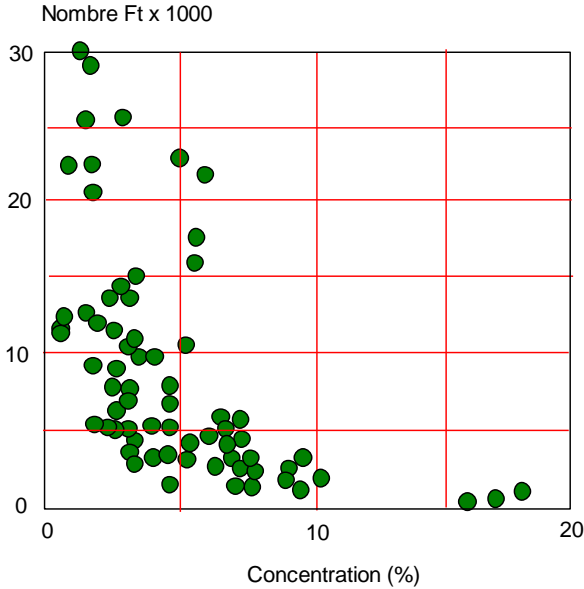


Figure 35 : Relation : Nombre F_t en fonction de la concentration de la suspension soutirée (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Variation de la vitesse de soutirage en fonction de la densité de la mixture

Nous avons caractérisé la vitesse de soutirage par la paramètre $\sqrt{g'H} = V_s$. Nous avons représenté sur la figure 36, la relation $V_s = f(\text{densité})$. Nous constatons que la vitesse de soutirage croît en fonction de la densité de la mixture d'une façon polynomiale de second ordre. Le soutirage débute à partir des densités supérieures à 1,010 (correspond à $(g'H)^{1/2} = 1,4$ m/s). Pour des densités importantes (dépassant la valeur du changement rhéologique) la vitesse de soutirage enregistre un certain ralentissement et même une stabilisation (un palier). Ceci est dû à ce que la mixture devient difficile et demande beaucoup d'énergie. Finalement, nous disons que si le soutirage est exécuté pour des faibles densités de mélanges, la quantité évacuée sera importante, et pour des fortes densités de mixture, la quantité évacuée sera forte.

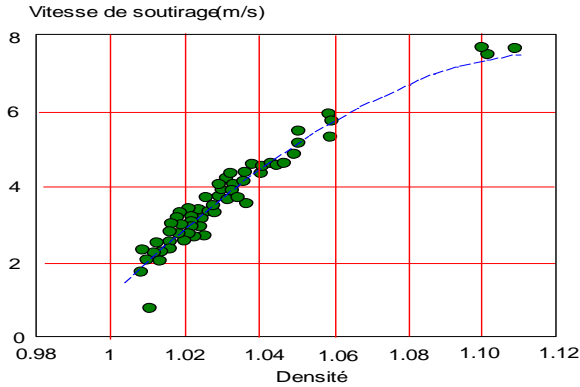


Figure 36 : Evolution de la vitesse de soutirage en fonction de la densité de la suspension (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Relation entre le débit de vase évacué et le facteur $(\Delta\rho/\rho_m) (H)^{1/2}$

Afin d’estimer la quantité de vase évacuée durant chaque opération de soutirage, nous avons relié le débit de vase Q_v à la densité de la mixture ρ_m et la charge d’eau H dans la retenue. Pour cela, nous avons représenté sur la figure 37 la variation du débit de vase en fonction du facteur $(\Delta\rho/\rho_m) (H)^{1/2}$. Nous constatons bien que le débit de vase Q_v soutiré par les vannes varie linéairement en fonction du facteur $(\Delta\rho/\rho_m) (H)^{1/2}$. La relation obtenue est :

$$Q_v = 0,64 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2})$$

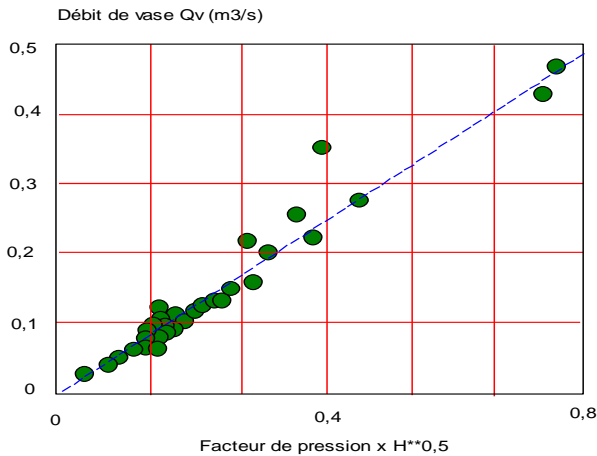


Figure 37 : Relation du débit de vase soutiré en fonction du facteur de pression (Données Sonelgaz) (Remini, 2017)

Durée de vie d'un barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée

La durée de vie d'un barrage diminue avec les dépôts successifs des sédiments, cependant les soutirages des courants de densité peuvent augmenter l'âge du barrage. La relation :

$T = T_0(1/1-S)$ (Remini, 1997) qui permet d'évaluer la « durée de vie » d'un barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée avec un rendement S . Avec $T_0 = W_0/W_{STA}$ représente la « durée de vie » d'un barrage sans la pratique de la technique du soutirage. Cette relation permet d'évaluer la « durée de vie » d'un barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée avec un rendement S . A cet effet nous avons calculé la « durée de vie » du barrage d'Erraguene, en supposant que la technique du soutirage sera pratiquée avec le rendement de 21%. Dans ce cas, la durée de vie du barrage sera de 220 ans au lieu de 174 ans (sans les soutirages).

CONCLUSION

Malgré son faible taux de comblement ($\eta=0.25\%/an$), les courants de densité se manifestent dans le lac du barrage. C'est la particularité du barrage d'Erraguene. C'est ainsi que le barrage s'envase par les dépôts de vase drainés par les courants de densité qui se propagent en périodes de crues le long des branches : Oued Babar et Oued Labsat. En 1994, la capacité de boue a été évaluée à 17,7 millions de m^3 . Sur base d'une vitesse de comblement de 0,25 %/an, le volume envasé est estimé à 28 millions de m^3 en 2014. Ce qui le classe comme un barrage fortement envasé. Cette quantité aurait pu être plus importante si ce n'est pas la pratique des soutirages des courants de densité par les vannettes de dévasement. Un volume de 10,7 millions de m^3 de vase a été soutiré durant la période : 1962-2010. Le rendement de soutirage le plus élevé égal à 47% a été obtenu durant la période : 1994-2004. Avec un tel rendement, la durée de vie du barrage d'Erraguene sera doublée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DEMMAK A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse du Dr-Ing, Univ de pierre et Marie Curie, Paris XI, France.
- HALLOUCHE O. (2007). Prévion du transport solide et sédimentation dans les barrages. Thèse de Doctorat sciences, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, 105 p.
- LAHLOU A. (1988). The silting of Moroccan dams. Sediment Budgets (Proceeding of the Porto Alegre. Symposium, Decmber 1988). IAHS. Publ. n° 174, 19, pp.71-77.
- MEKERTA B., TISOT J.P. (1993). Etude de la sédimentation dans les retenues des barrages, propriétés mécaniques des sols fins. communication.1^{er} congrès national des grands barrages, Alger 24 et 25 mai. 1-9.
- MECHIN Y. (1980). Rapport général introductif sur le dévasement des retenues. Séminaire international sur le dévasement des retenues. Tunis (Tunisie), 1-4 juillet, 5p.
- RADOANE M., RADOANE N. (2005). Dams, sediment sources and Reservoir silting in Romania, Geormophology, n°71, pp.112-125.
- REMINI B. (1997). Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique de soutirage. Thèse de Doctorat d'état en Hydraulique. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin, 342 p.
- REMINI B., BENSALFIA D., MISSOUM M. (2015). Silting of Foum el Gherza Reservoir. GeoScience Engineering, Vol. LXI , n°.1. pp.1-9, ISSN 1802-5420.
- REMINI B., BENSALFIA D., NASROUN T. (2015). Impact of sediment transport of the Chellif River on silting of the Boughezoul reservoir (Algeria). Journal of Water and Land Development. 2015, n° 24,. pp.35-40. DOI: 10.1515 /jwld-2015-0005
- REMINI B., HALLOUCHE O. (2005). Prévion de l'envasement dans les barrages du maghreb. Larhyss Journal, n° 4, pp.69-80.