

Efficacité d'un seuil artificiel sur l'oxygénation de l'eau et l'élimination de CH₄ contenu dans l'eau évacuée par le barrage hydroélectrique de Petit Saut (Guyane française)

The efficiency of an artificial weir in oxygenating and removing CH₄ from water released by the Petit Saut hydroelectric dam (French Guiana)

S. RICHARD^{1*}, A. GRÉGOIRE², P. GOSSE³

Reçu le 5 décembre 2003, accepté le 14 mars 2005**.

SUMMARY

From the moment tropical reservoirs are impounded, climatic conditions cause rapid (within several weeks) and marked thermal stratification, especially during the dry season. This phenomenon is further exacerbated by the chemical and biochemical processes taking place in the reservoir due to the decomposition of submerged organic matter. In dense tropical forests, the overhead biomass is estimated at roughly 170 t(C)/ha, and the carbon contained in the soil is also not negligible since it is on the order of 100 t(C)/ha. The degree of biodegradability of the different compounds in the flooded biomass is variable, ranging from a few weeks for bacteria to several centuries for tree trunks.

The studies carried out at Petit Saut (French Guiana) show that, immediately after impoundment, only the epilimnion (a few dozen centimetres thick) was oxygenated whereas the hypolimnion was characterized by complete anoxia and a very high methane content (about 15 mg/l). Water quality in the river downstream from the reservoir was of course strongly linked to variations in the water quality in the reservoir as well as to its operating mode. The waters passing through the turbines, coming from the bottom layers, were anoxic and loaded with fixed or volatile reducing compounds (e.g., CH₄, H₂S), and were responsible for a high immediate or progressive oxygen demand. At Petit Saut, despite an inflow of good quality water, there has been a progressive deoxygenation in the river downstream due to the high methane content (roughly 8 mg/l) of the turbinated water. Thus, 40 km downstream from the dam, the oxygen content was less than 2 mg/l and therefore incompatible with most aquatic life. To solve this problem, it was necessary to build an

1. Hydréco, Laboratoire Environnement, BP 823, 97388 Kourou Cedex, Guyane française, France. Téléphone : 00 594 594 32 73 02, télécopie : 00 594 594 32 21 29.
2. Électricité de France, Savoie Technolac, 73373 Le Bourget-du-Lac Cedex, France.
3. Électricité de France, 6, quai Watier, 78401 Chatou Cedex, France.

* Correspondance : sandr.richard@wanadoo.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 mai 2006.

aerating weir capable of reoxygenating the turbinated waters and, more importantly, eliminating reducing gases such as methane at the same time.

The function of the overflow weir was to entrain air bubbles into the water and to give these bubbles a sufficiently long immersion time to ensure that they dissolve. At the time of its installation, only three examples of oxygenating weirs existed in the entire world, all located in the United States. The weir configuration was tested using a physical model to qualitatively examine the form of the flow both across the weir and downstream from it. The degree to which air bubbles were entrained in the water was also tested, but not the question of evaluating the flux of gaseous exchanges between the air and the water.

The system that was finally designed by EDF, in October 1994, was a metallic weir with two consecutive falls, the configuration of which respected the main physical criteria that play a significant role in the oxygenation of water, i.e.:

- the height of the falls (roughly 5.40 m, depending on the flow rate);
- the thickness of the water stream, the function of which is to entrain air bubbles and keep them in the water for a sufficiently long period of time for the oxygen to dissolve (between 12 and 25 seconds, depending on the flow rate);
- the dimensions of the receiving basin of the first waterfall where the air bubbles are held (5 hexagonal alveoli); and
- systems to promote the fragmentation of the flow.

This structure was placed in the tailrace channel of the plant, approximately 100 m downstream from the main dam. This location protected it from floods and did not create an extra obstacle in the river. In addition, it allowed the water to be re-oxygenated as soon as it left the reservoir.

The efficiency of the two waterfalls of the Petit Saut re-aerating weir was tested at two different turbine flow rates: 80 m³/s and 230 m³/s. In 1996, the results of the measurements showed that for a flow rate of 230 m³/s, upstream of the weir the concentrations of CH₄ were around 5 mg/l and dissolved oxygen was 0.8 mg/l. Downstream from the weir CH₄ concentrations were 1.3 mg/l and dissolved oxygen concentrations were 6.8 mg/l. The dissolved methane elimination rate was approximately 75 per cent. At a flow rate of 80 m³/s, upstream of the weir the concentration of CH₄ was 5.5 mg/l and the dissolved oxygen concentration was 0.7 mg/l. Downstream from the weir concentrations of CH₄ and dissolved oxygen were 1.0 mg/l and 7.1 mg/l, respectively. The dissolved methane elimination rate was around 80%. The efficiency of the re-oxygenation was always greater than 90%.

These data prove that the efficiency of the Petit Saut weir installation was higher when the turbine flow rate was lower. This could be due to a greater waterfall height, the better entrainment of air bubbles per unit volume and/or a longer air bubble residence time in the downstream flow.

Between December 2001 and February 2003, for a flow rate of 200 m³/s, the efficiency of the weir decreased by 10%, with the dissolved methane elimination rate at around 70-75%. The level of re-oxygenation was around 80%. Since February 2003, for a flow rate of 100 m³/s, the efficiency of the weir has decreased by 10%, the dissolved methane elimination rate was around 70% and the level of re-oxygenation was around 75%.

On a local scale, the effect on the quality of the river water has been very positive, as aquatic life has been maintained. Without the weir, the methane contained in the turbinated water would have been progressively transformed, along the course of the river, into carbon dioxide. In the absence of significant additions of good quality water and without the weir, a large part of the course of the river would have a dissolved oxygen content of less than 2 mg/l, the critical threshold for the maintenance of aquatic life.

At present time, the results of the current ecological survey are used to support studies on biogeochemical processes.

Keywords: *aerating weir, methane, hydroelectric dam, Petit Saut, French Guiana, oxygen consumption.*

RÉSUMÉ

Quelques mois après le début de la mise en eau du barrage de Petit Saut, la mise en service normale de l'usine conduisait à une désoxygénation de l'eau du tronçon de rivière aval, le rendant incompatible avec la vie aquatique. La solution retenue a été la construction d'un seuil, afin d'apporter de l'oxygène et d'éliminer les gaz réducteurs produits au fond de la retenue, notamment le méthane, consommateur potentiel d'oxygène dissous.

Un seuil métallique à deux lames déversantes successives a été construit ; sa configuration prend en compte les principaux critères physiques jouant un rôle significatif sur l'oxygénation de l'eau (hauteur de chute, épaisseur de la lame déversante, le dimensionnement du bassin de réception des chutes, la présence de dispositifs favorisant l'éclatement de la lame d'eau).

Placé dans le canal de fuite de l'usine, à une centaine de mètres à l'aval du barrage principal, il est à l'abri des crues et ne crée pas d'obstacle supplémentaire en rivière.

L'article chiffre l'effet d'aération de ce seuil pour les deux gaz O_2 et CH_4 dans deux configurations : celles consécutives à l'abaissement partiel de la chute amont réalisé en deux étapes. Après décembre 2001, pour le débit moyen turbiné (près de $200 \text{ m}^3/\text{s}$), l'efficacité d'aération du seuil a baissé de près de 10 % (gain de 80 % en oxygène dissous et élimination de 70 % et 75 % du méthane dissous). Après février 2003, pour un débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 75 % du déficit amont en oxygène dissous est comblé et près de 70 % du méthane dissous éliminé.

Mots clés : *seuil d'aération, méthane, barrage hydroélectrique, Petit Saut, Guyane française, consommation en oxygène.*

1- INTRODUCTION

Dans la plupart des réservoirs édifiés en zone intertropicale, un important déficit en oxygène apparaît dans les couches de fond, dès la mise en eau. La cause principale de cette situation est la décomposition de la végétation submergée, associée à une diminution de l'hydrodynamisme. Les processus biochimiques en jeu conduisent à la formation d'éléments dissous comme le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hydrogène sulfuré (H_2S). À Petit Saut, en Guyane française, la fermeture du fleuve Sinnamary (débit moyen de l'ordre de $270 \text{ m}^3/\text{s}$) en janvier 1994 a créé une retenue d'environ 365 km^2 , immergeant de la forêt primaire représentant de l'ordre de 8 millions de tonnes de carbone, litière comprise (DELMAS *et al.*, 2001 ; GRÉGOIRE et RICHARD, 2002 ; RICHARD *et al.*, 2000). La biomasse se répartit comme suit : $170 \text{ t(C)}/\text{ha}$ pour la biomasse émergée et $100 \text{ t(C)}/\text{ha}$ dans le sol. Les principales caractéristiques techniques de l'aménagement sont présentées dans le tableau 1.

Ainsi, en quelques jours la masse d'eau s'est stratifiée avec un épilimnion oxygéné (d'une profondeur variant de quelques centimètres les premières semaines à plusieurs mètres) et un hypolimnion anoxique contenant de fortes concentrations de méthane (jusqu'à 15 mg/l en moyenne), entraînant l'absence d'oxygène dissous dans les eaux turbinées au début de la mise en eau (figure 1).

Tableau 1 Principales caractéristiques de l'aménagement de Petit Saut.

Table 1 Main characteristics of Petit Saut reservoir.

Rivière	Sinnamary
Taille du bassin versant au barrage	5 927 km ²
Débit moyen annuel	267 m ³ /s
Débit minimum	80 m ³ /s
Fermeture du barrage	Janvier 1994
Date de fin de mise en eau	Juin 1995
Profondeur maximale	35 m
Profondeur moyenne	11 m
Surface du réservoir à 35 m	365 km ²
Surface du réservoir à 31 m	223 km ²
Surface des îles à 35 m	105 km ²
Longueur maximale	60 km
Largeur maximale	60 km
Temps de rétention moyen	6 mois
Volume total	3 500 10 ⁶ m ³
Capacité installée	116 MW (4 turbines of 29 MW)
Type de végétation submergée	Forêt équatoriale
Végétation émergée	170 T(C)/ha
Carbone du sol	100 T(C)/ha
Carbone total	8 10 ⁶ T(C)

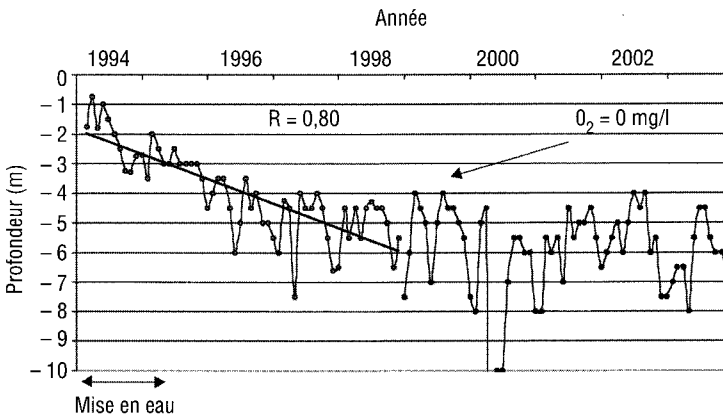


Figure 1 Évolution de l'épaisseur de l'épilimnion depuis le début de la mise en eau (en 2000 : crue exceptionnelle ; oxygène dissous sur toute la colonne d'eau en avril).

Evolution of the thickness of the epilimnion since impoundment (2000: major rise in the river discharge; dissolved oxygen in all the water column in April).

Des dispositions efficaces en vue d'augmenter la teneur en oxygène dissous de l'eau restituée au barrage ont été prévues au stade de la conception du barrage de Petit Saut. La configuration des pertuis de fond a été conçue de manière à favoriser un brassage eau-atmosphère important ; les débits supplémentaires non turbinés peuvent également être évacués par les ouvrages de surface, tels le clapet (pour les cinq premiers mètres de la colonne d'eau) et le déversoir de crue. Ces dispositifs sont essentiellement utilisés pour écrêter les crues.

Le suivi de la qualité physico-chimique de l'eau mis en place (RICHARD *et al.*, 1997) a montré l'effet positif de ces dispositions dès la mise en eau du réservoir en janvier 1994, le débit étant alors évacué par les pertuis de fonds. Mais, il a été mis en évidence lors des premiers essais de turbinage effectués quelques mois plus tard, la nécessité d'actions complémentaires pour garantir la valeur d'oxygène dissous jugée minimale pour le maintien de la vie aquatique ; cette teneur (mesure instantanée) est de 2 mg/l d'oxygène dissous en tout point de la rivière aval pour une situation normale de fonctionnement de l'usine hydroélectrique. Cette valeur a été décidée par les autorités publiques suite aux observations réalisées sur la résistance des poissons à l'hypoxie en milieu tropical (BENECH et LEK, 1981).

2 – MÉTHODOLOGIE DE MESURES D'O₂ ET CH₄

Plusieurs points situés en amont et en aval du barrage ont été suivis à fréquence variable au cours du temps (RICHARD *et al.*, 1997). Pour l'oxygène dissous, une sonde spécifique WTW OXY 196 est utilisée *in situ*. Actuellement, ce paramètre est mesuré mensuellement dans la retenue (profils verticaux) et tous les jours en aval de la retenue (surface). Il est mesuré en continu à Pointe Combi, station située à 45 km à l'aval du barrage, point identifié comme le plus sensible en terme de qualité d'eau (figure 2). C'est à ce niveau que le minimum d'oxygène est atteint (RICHARD, 1996). Le système de mesure automatique OTT installé enregistre aussi 4 autres paramètres (température, conductivité, pH, turbidité). La maintenance de la station est réalisée hebdomadairement. Une moyenne mensuelle est calculée afin de faciliter la lecture des données en continu.

La technique de prélèvement du méthane consiste à injecter 20 ml d'eau prélevés à la seringue dans des tubes chromatographiques sous vide, selon la technique du headspace (GALY-LACAUX *et al.*, 1996). L'eau de surface est prélevée en aval, alors que dans la retenue les prélèvements se font selon des profils réalisés de la surface au fond à l'aide d'une pompe péristaltique. Le méthane dissous est mesuré à l'aide d'un chromatographe (HP 5890A) équipé d'un détecteur FID et d'une colonne semi-capillaire Poraplot Q au laboratoire de Petit Saut dans la semaine suivant le prélèvement. Les moyennes des concentrations en méthane dissous sont calculées par extrapolation linéaire de plusieurs mesures (en surface, à - 3 m, - 5 m, - 10 m, - 15 m, - 20 m, - 25 m et - 30 m).

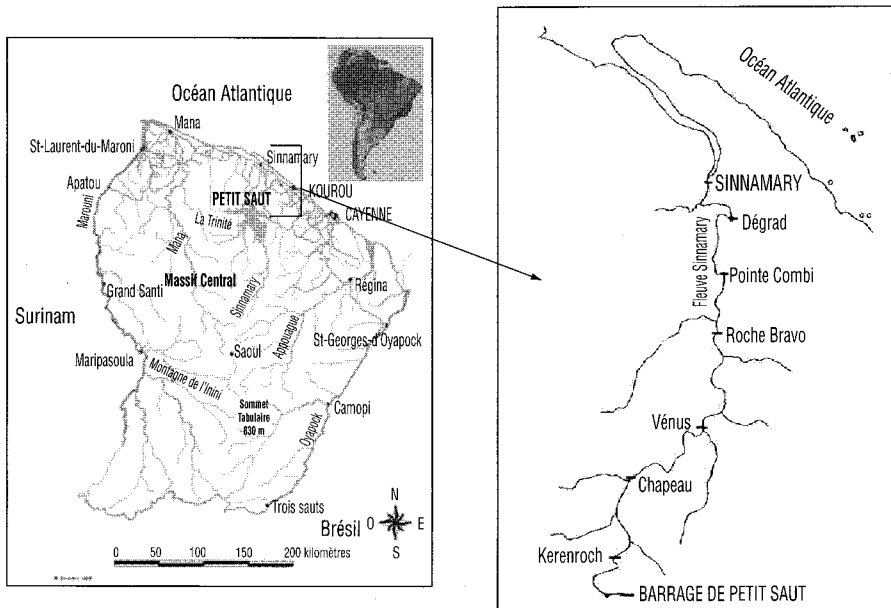


Figure 2 Situation de la zone d'étude.
Location of the study stations.

3 – RÉSULTATS - DISCUSSION

3.1 Stratification physico-chimique de la retenue

La stratification thermique traduite par la figure 3 est permanente et associée à une augmentation de la surface au fond de la concentration des éléments réducteurs tel le méthane pris pour exemple. La retenue est ainsi constituée d'un épilimnion oxygéné représenté par la figure 1 avec une évolution temporelle marquée par un enfoncement progressif de l'oxycline.

La Guyane bénéficiant d'une saison des pluies de décembre à juin et d'une saison sèche de juillet à novembre, la première période est favorable à une diminution des concentrations en éléments réduits alors que la deuxième période à une augmentation des teneurs, comme le montre la figure 4. Les plus fortes concentrations en méthane sont observées lorsque le temps de rétention est élevé (fin de saison sèche). Le temps de rétention, qui joue un rôle important sur la qualité des eaux, est lui-même lié à la pluviométrie.

Cette situation entraîne l'évacuation par les turbines (prises d'eau situées au fond du réservoir) d'eau quasi anoxique et chargée en éléments réducteurs dont les concentrations (figure 4) sont celles observées en moyenne dans le réservoir (RICHARD et CERDAN, 2003). La présence d'oxygène dissous dans l'eau turbinée montre que l'ensemble de la colonne d'eau est turbiné.

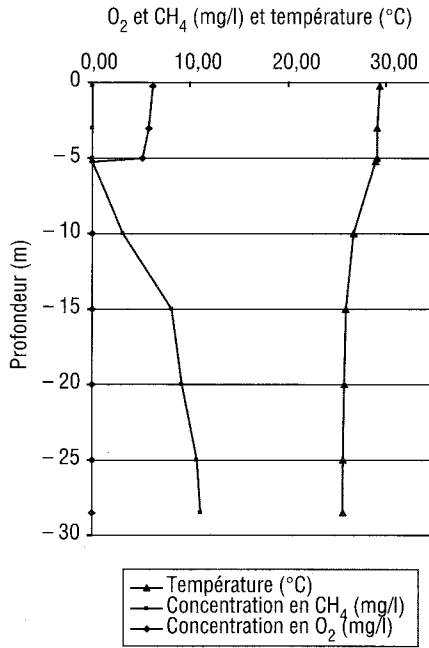


Figure 3 Profils des concentrations en oxygène dissous et méthane dissous associés à la température (°C) en janvier 2002.

Vertical profiles of dissolved oxygen and dissolved methane with temperature (°C) in January 2002.

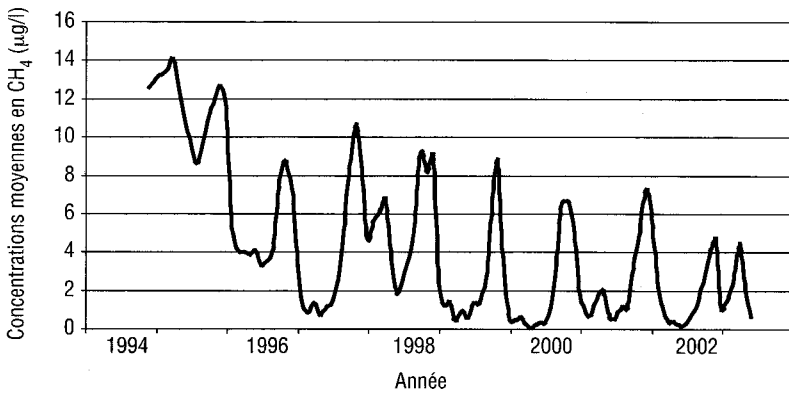


Figure 4 Concentrations moyennes en méthane dissous (mg/l) dans la colonne d'eau du réservoir depuis le début de la mise en eau.

Average concentrations of dissolved methane (mg/l) in the water column of the reservoir since impoundment.

3.2 Oxygénation du Sinnamary aval avant turbinage

Pendant les cinq premiers mois suivant le début de la mise en eau de la retenue de Petit Saut, seul un débit réservé de 100 m³/s était restitué à l'aval du barrage par les pertuis de fond. Dans cette configuration, des phénomènes de jet et de ressaut hydraulique apparaissant dans un milieu peu profond (environ 1 m) entraînent un brassage important de l'eau ; cette situation permettait une ré-oxygénation de l'eau jusqu'au niveau d'équilibre avec l'atmosphère, soit de l'ordre de 8 mg/l.

Ainsi, l'oxygénation de l'eau du Sinnamary, dans le tronçon aval du barrage, est demeurée compatible avec la vie aquatique durant ces 5 mois précédant l'essai des turbines. Toutefois, comme le montrent les analyses physico-chimiques effectuées le long du fleuve (figure 5), jusqu'à l'entrée de l'estuaire, une décroissance systématique de l'ordre de 3 à 4 mg/l des teneurs en oxygène dissous était observée en permanence (RICHARD *et al.*, 1997). Elle résultait d'une demande chimique en oxygène (oxydation du fer ferreux notamment formé en anoxie par l'inondation des sols latéritiques) et d'une demande biologique classique. On a en effet pu établir que le méthane dissous qui n'était pas encore mesuré à l'aval n'était alors qu'à l'état de traces dans l'eau sortant des pertuis de fond (GOSSE *et al.*, 2000).

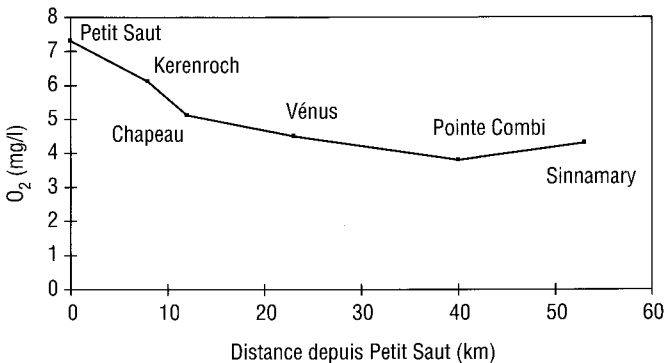


Figure 5 Évolution spatiale des concentrations en oxygène dissous (mg/l) dans le fleuve Sinnamary de Petit Saut (pied du barrage) à Sinnamary (ville) le 26/03/94 avant turbinage.

Longitudinal profile of dissolved oxygen (mg/l) in the Sinnamary River from Petit Saut (dam) to Sinnamary (City) on 26/03/94 before turbinning.

3.3 Situation après les premiers essais de turbinage

Faute de turbulence générée à l'interface eau-atmosphère, l'eau turbinée qui sort en écoulement noyé dans un milieu profond, n'a pas la possibilité de s'oxygéner dans le canal de fuite de l'usine et était donc dépourvue d'oxygène dissous.

Il est apparu que pour pouvoir turbiner cette eau anoxique sans abaisser la teneur en O₂ dissous en dessous de 2 mg/l à Pointe Combi, une dilution importante avec l'eau oxygénée, restituée par les pertuis de fond était indispensable,

les besoins de dilution augmentant entre juin et septembre 1994 (GOSSE et GRÉGOIRE, 1997), période où le temps de rétention des eaux augmente dans la retenue.

Pour expliquer le déficit d'oxygène aval observé, plus élevé que celui trouvé sur la base d'un calcul classique de bilan d'oxygène dissous, l'hypothèse a été émise que l'oxydation du méthane dissous en était responsable. Ce gaz, trouvé à l'état de traces dans le réservoir avant les essais de turbinage, avait fortement augmenté en concentration depuis, et il était présent fin août-début septembre 1994 à des teneurs de plusieurs mg/l dans l'eau non brassée sortant des turbines (GOSSE, 1994).

Les analyses physico-chimiques, effectuées par la suite par le laboratoire d'Aérodologie de l'Université de Toulouse, le laboratoire Hydréco et Électricité de France (EDF) sur l'eau turbinée comme sur celle transitant par les vannes de fond, ont confirmé cette hypothèse, en montrant que les principaux paramètres significativement discriminants entre les deux veines d'eau étaient les teneurs en gaz dissous, oxygène et méthane, et en démontrant le rôle décisif du méthane. Ce gaz réducteur qui est connu pour sa demande en oxygène dans un milieu oxygéné est apparu à l'origine de la détérioration de la qualité de l'eau en période de turbinage (GOSSE et GRÉGOIRE, 1997, GOSSE *et al.*, 2000, GOSSE *et al.*, 2002). Les importants remous, en sortie des vannes de fond, permettent la ré-oxygénation de l'eau en même temps que le dégazage du méthane.

Les mesures d'EDF, du CESAC (Centre d'Écologie des Systèmes Aquatiques Continentaux de l'Université de Toulouse) et du laboratoire Hydréco, ont montré que l'oxydation du méthane d'origine hypolimnique restitué à l'aval du barrage se réalise en moins de 2 jours. Ce temps correspond au parcours des masses d'eau entre le barrage et l'entrée de l'estuaire pour un débit de 100 m³/s. De plus, il a été montré que 1 mg/l de méthane créait un puits d'oxygène dissous proche de 3 mg/l dans le Sinnamary aval. Ainsi, du fait des fortes teneurs en méthane (de l'ordre de 6 mg/l en moyenne dans le réservoir et 3 mg/l dans l'eau turbinée début septembre 1994) apparaissant près de 6 mois après le début de la mise en eau, des dispositions devaient être prises pour concilier la production d'électricité et la sauvegarde de la vie aquatique.

Les sulfures, étudiés par DUMESTRE (1998), ne semblent pas représenter une part importante de la consommation d'oxygène dissous. Il montre qu'étant donné la nature latéritique des sols, les sulfures de fer pourraient tenir une place importante dans la consommation d'oxygène dissous, mais même au plus fort des concentrations en sulfures (170 µg/l), seul 0,3 mg/l d'oxygène dissous serait consommé à l'aval. À la sortie des vannes de fond, les mesures montrent une élimination quasi totale des sulfures (0,02 µg/l valeur maximale mesurée à l'aval du seuil (LACAUX, 1996)).

3.4 Fonction du seuil construit dans le canal de l'usine

Pour résoudre le problème de désoxygénation aval, l'idéal était de se rapprocher le plus possible des conditions d'aération observées avec l'utilisation des seuls pertuis de fond. Il fallait donc non seulement réoxygéner l'eau turbinée mais aussi éliminer tout ou partie des gaz réducteurs et principalement le méthane.

Dans le réservoir, 2 ans après la mise en eau (1996), dans les couches inférieures de la masse d'eau, les concentrations en oxygène dissous étaient nulles, alors que celles du méthane étaient très élevées (de l'ordre de 15 mg/l en fin de saison sèche). Dans les couches supérieures, les teneurs en oxygène étaient très correctes : environ 7 mg/l, alors que celles de méthane étaient proches de zéro, sous l'effet de l'action des bactéries méthanotrophes localisées à la proximité de l'oxycline (DUMESTRE, 1998).

Dans l'eau turbinée, à la même période, les teneurs en oxygène étaient nulles alors que celles de méthane atteignaient jusqu'à 10 mg/l en fin de saison sèche.

La solution finalement retenue a été la mise en place des 2 dispositifs qui semblaient les plus appropriés : un seuil à lame déversante et des diffuseurs d'air comprimé. Ce dernier a été abandonné, car sa valeur ajoutée s'est révélée faible (GOSSE et GRÉGOIRE, 1997).

La fonction de la lame déversante (figure 6) est d'entraîner les bulles d'air dans l'eau et de permettre une immersion suffisante de celles-ci pour assurer leur dissolution.

Seuls 3 exemples de seuil à lame déversante en aval de barrages hydro-électriques – dans un but unique d'apport d'oxygène dissous – ont été, à l'époque, identifiés dans le monde ; tous sont situés aux États Unis (EPRI, 1990 ; GOSSE et GRÉGOIRE, 1997 ; HAUSER et PROCTOR, 1993).

La configuration du seuil a été testée par EDF sur modèle physique. Pour des problèmes de similitude, il ne s'agissait pas d'évaluer des flux d'échange gazeux entre l'air et l'eau mais d'examiner qualitativement la forme de l'écoulement sur et en aval du seuil ainsi que le degré d'entraînement de bulles d'air dans l'eau (GOSSE et GRÉGOIRE, 1997).



Figure 6 Seuil à lames déversantes dans sa configuration initiale.
Aerating weir in the initial configuration.

Le dispositif finalement conçu par EDF, en octobre 1994, a été un seuil métallique à 2 chutes d'eau successives. Constitué de plusieurs rangées d'aiguilles escamotables, le seuil a une configuration qui a tenu compte le plus possible des contraintes techniques d'exploitation et des principaux critères physiques jouant un rôle significatif sur l'oxygénation de l'eau, à savoir :

- la hauteur de chute (maximum de 5,40 m en fonction des débits) ;
- l'épaisseur de la lame déversante dont la fonction est d'entraîner les bulles d'air et de les maintenir suffisamment de temps dans l'eau (entre 12 à 25 secondes suivant les débits) pour favoriser ainsi sa réaération ;
- le dimensionnement du bassin de réception de la première chute où séjournent les bulles d'air (5 alvéoles hexagonales) ;
- la présence de dispositifs favorisant l'éclatement de la lame d'eau.

Cet ouvrage a été placé dans le canal de fuite de l'usine, à une centaine de mètres à l'aval du barrage principal. Cet emplacement le met à l'abri des crues et ne crée pas un obstacle supplémentaire en rivière ; de plus, il permet de ré-oxygéner l'eau dès sa sortie du réservoir.

L'efficacité des 2 chutes du seuil ré-aérateur de Petit Saut a été testée à 2 débits turbinés différents au deuxième semestre 1996 : 80 m³/s et 230 m³/s :

- Pour un débit de 230 m³/s,

- à l'amont du seuil
5 mg/l de CH₄ et 0,8 mg/l d'O₂ ;

- à l'aval du seuil
1,3 mg/l de CH₄ et 6,8 mg/l d'O₂ ;

soit un taux d'élimination du méthane dissous de 75 %.

- Pour un débit de 80 m³/s,

- à l'amont du seuil
5,5 mg/l de CH₄ et 0,7 mg/l d'O₂ ;

- à l'aval du seuil
1,0 mg/l de CH₄ et 7,1 mg/l d'O₂ ;

soit un taux d'élimination du méthane dissous de 80 %.

L'efficacité de la ré-oxygénation (comblement du déficit amont à la valeur d'équilibre atmosphérique), quant à elle approchait 90 % (teneur à saturation proche de 7,7 mg/l).

L'efficacité d'ensemble du seuil de Petit Saut est d'autant plus grande que le débit turbiné est faible. Cela peut être dû à une plus grande hauteur de chute, un meilleur entraînement des bulles d'air par unité de volume et/ou un maintien plus long de ces bulles d'air dans l'écoulement aval.

Sur la base de l'exploitation des mesures mensuelles d'oxygène et de méthane dissous collectées en amont et en aval du seuil aérateur au cours des deux années 1999-2000 (GOSSE *et al.*, 2001), les formules 1 et 2 suivantes peuvent être considérées comme une bonne schématisation de l'effet d'aération du seuil avant son démontage partiel de 2001 dans la gamme courante de débit turbiné 160-270 m³/s :

$$O_2(AS) = CS - 0,12 * (CS - O_2(AM)) \quad (\text{formule 1})$$

$$CH_4(AS) = 0,3 * CH_4(AM) - 0,0175 CH_4(AM)_2 - 0,1 \quad (\text{formule 2})$$

avec $O_2(AM)$ et $CH_4(AM)$ teneurs en oxygène et méthane dissous (mg/l) dans l'eau du réservoir entrant dans les turbines, la mesure étant faite dans les groupes de l'usine ; $O_2(AS)$ et $CH_4(AS)$ teneurs en oxygène dissous et en méthane dissous (mg/l) à l'aval du seuil ; CS teneur à saturation.

La formule 1 indique que le seuil comble 88 % d'un déficit amont en oxygène dissous à la valeur d'équilibre atmosphérique.

La formule 2, valable pour une teneur amont en méthane comprise entre 2 mg/l et 7 mg/l, donne un taux d'élimination de méthane par le seuil compris entre 79 % et 85 %, reflétant la légère tendance donnée par les mesures d'un taux d'autant plus grand que la teneur amont en méthane est élevée.

3.5 Situation actuelle

Du fait du relèvement du niveau aval de l'eau, sous l'effet de la présence du seuil aérateur, la puissance des turbines a été diminuée de 11 %. Ainsi, la conception initiale du seuil a été prévue de manière à pouvoir le démonter progressivement au fur et à mesure de l'amélioration de la qualité de l'eau de la rivière à l'aval.

L'épaisseur de la couche oxygénée est en augmentation depuis le début de la mise en eau, elle atteint 7 m fin 2003. Des traces d'oxygène sont ainsi apparues progressivement dans l'eau turbinée pour atteindre un maximum de 2,9 mg/l. Ceci se traduit par une augmentation progressive des teneurs en oxygène dissous à Pointe Combi de 1996 à 2001 (figure 7), en raison d'une baisse progressive des teneurs en méthane dans le fond du réservoir et par conséquence dans l'eau turbinée.

Un premier abaissement partiel d'une hauteur de 1,20 m a pu être réalisé en décembre 2001.

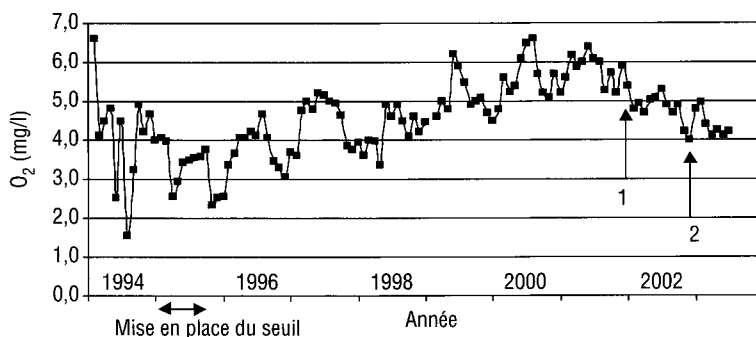


Figure 7 Évolution des concentrations mensuelles en oxygène dissous (mg/l) à Pointe Combi depuis le début de la mise en eau (1 : premier abaissement ; 2 : deuxième abaissement).

Longitudinal profile of dissolved oxygen (mg/l) at Pointe Combi since impoundment (1: first lowering; 2: second lowering).

Le suivi de la qualité de l'eau dans le Sinnamary, à l'aval du barrage, montre que, depuis l'abaissement du seuil aérateur, les teneurs en oxygène à Pointe Combi ont diminué de l'ordre de 1,2 mg/l tout en restant bien supérieures à 2 mg/l, ce qui est le cas en tout point du Sinnamary aval (figure 7). L'exploitation des données mensuelles de suivi suggère une diminution d'efficacité d'aération du seuil de l'ordre de 10 % pour des débits proches de 200 m³/s ; comme c'est le cas du taux d'élimination du méthane (RICHARD et CERDAN, 2002). La figure 8 illustre ces résultats pour l'année 2002.

Les teneurs en oxygène au point de contrôle le plus sensible de la rivière, restant toujours supérieures à 4 mg/l, la décision a été prise d'abaisser une deuxième fois la hauteur du seuil aérateur.

En février 2003, la hauteur du seuil a été à nouveau diminuée de 1,20 m par enlèvement de 3 rangées d'aiguilles sur la chute amont. À ce jour, il ne reste ainsi plus qu'une seule chute de 2 mètres de haut. Les premiers résultats de mesure de l'efficacité du seuil dans cette nouvelle configuration suggèrent, pour un débit turbiné de 100 m³/s, une élimination d'environ 70 % pour le méthane dissous et d'environ 75 % pour le comblement de l'oxygène dissous. Dans la rivière aval, au point de contrôle de Pointe Combi, la teneur en oxygène a diminué d'environ 1 mg/l mais reste en moyenne de 4,2 mg/l (figure 7).

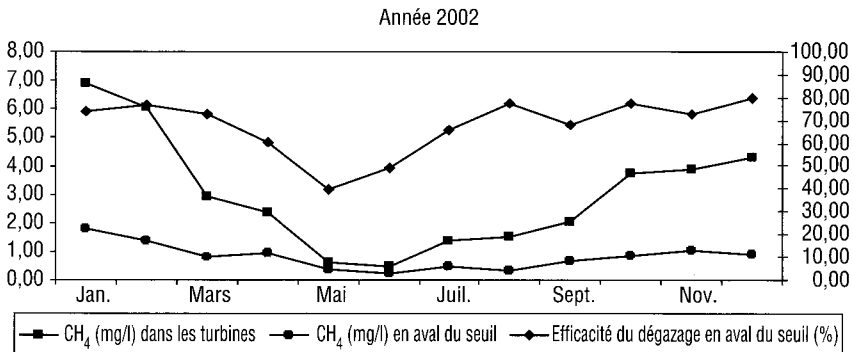


Figure 8 Concentrations en méthane dissous (mg/l) dans les turbines et en aval du seuil associées à l'efficacité du dégazage (%) en 2002.

Dissolved methane concentrations (mg/l) in the turbines and downstream from the aerating weir, associated with the efficiency of elimination of gases (%) in 2002.

4 - CONCLUSION

L'envoiment de fortes quantités de matière organique a entraîné la désoxygénation de la masse d'eau du réservoir. La mise en place du seuil aérateur a favorisé le dégazage du méthane en même temps que la ré-oxygénation de l'eau turbinée, en rapprochant la teneur de ces gaz au niveau d'équilibre atmosphérique. La qualité des eaux dans le réservoir s'étant

progressivement améliorée au fil des années, la hauteur de chute du seuil (garante d'une bonne efficacité) a été diminuée par deux fois. Les teneurs en oxygène sont toujours restées supérieures à 2 mg/l à Pointe Combi, concentration réglementaire minimale exigée au point le plus critique du tronçon aval.

Il est à noter que les opérations d'abaissement de la hauteur du seuil aérateur sont réversibles à tout moment en cas d'apparition de situations critiques dans le Sinnamary aval. Si une telle situation se produisait, pendant la période transitoire, l'alimentation de la rivière serait alors assurée selon les dispositions prévues avant la construction du barrage et qui ont donné toutes satisfactions lors des travaux d'abaissement du seuil, à savoir une restitution partielle de l'eau à l'aval du barrage par les vannes de fond ou le clapet de surface.

Actuellement, le suivi de la retenue et du tronçon aval est renforcé par des travaux axés sur les processus biogéochimiques mis en jeu dans la production et l'émission de gaz à effet de serre. Ce travail développera également un modèle prédictif d'évolution de la qualité des eaux de la retenue en utilisant le modèle Symphonie 2D couplé à un module biogéochimique (thèse d'Université, Toulouse III, soutenance prévue fin 2005). Les données acquises pendant 10 ans par le Laboratoire Environnement de Petit Saut (Hydréco) sont utilisées pour la validation du modèle.

5 – REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe du laboratoire Environnement de Petit Saut, notamment Cécile REYNOUARD et Benoit BURBAN.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENECH V., LEK S. 1981. Résistance à l'hypoxie et observations écologiques pour seize espèces de poissons du Tchad. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14, 2, 153-168.
- DELMAS R., GALY-LACAUX C., RICHARD S., 2001. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 4, 993-1003.
- DUMESTRE J.F., 1998. Écologie microbienne de la retenue hydroélectrique de Petit Saut (Guyane). Mise en place de communautés bactériennes oxydantes – Conséquences sur les émissions de gaz polluants et sur la désoxygénation de l'eau, dans le lac et dans le fleuve en aval., Th. Doct. Univ. Toulouse III, France, 292 p.
- EPRI, 1990. Assesment and guide for meeting dissolved oxygen water quality standards for hydroelectric plant discharges, Report GS/7001/project, 2694-8.
- GALY-LACAUX C., JAMBERT C., DELMAS R., DUMESTRE J.F., LABROUE L., CERDAN P. & RICHARD S., 1996. Émission de méthane et consommation d'oxygène dans la retenue de Petit-Saut en Guyane. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, 322, 1013-1019.

- GOSSE P., 1994. Hypothèse de l'influence des gaz formés en anaérobiose dans le réservoir de Petit Saut sur les baisses d'oxygène dissous dans le Sinnamary aval. *Rapport*. EDF/DER/HE31/94/38. Électricité de France. Paris . 26 p.
- GOSSE P., GRÉGOIRE A., 1997. Dispositifs de réoxygénation artificielle du Sinnamary à l'aval du barrage de Petit Saut. *Hydroécol. Appl.*, 9, 1-2, 23-56.
- GOSSE P., DELMAS R., DUMESTRE J.F., GALY-LACAUX C., LABROUE L., MALATRE K., RICHARD S., 2000. Demonstration of the determining role of dissolved methane in the consumption of dissolved oxygen, in an equatorial river. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 27, 1400-1405.
- GOSSE P., CERDAN P., RICHARD S., SISSAKIAN C., 2001. Point sur l'évolution de l'écosystème aquatique du Sinnamary, 6 ans après la mise en eau du réservoir hydroélectrique de Petit Saut (Guyane) : Rapport HP71/00/37. Électricité de France. Paris. 20 p.
- GOSSE P., DUMESTRE J.F., RICHARD S., 2002. Dissolved methane and oxygen modelling in an equatorial river downstream of a new reservoir. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 28, 1454-1458.
- GRÉGOIRE A., RICHARD S., 2002. Impact of flooded biomass on the reservoir water quality during the first years of impounding. International commission on large dams. Symposium on reservoir management in tropical and sub-tropical regions. Iguassu, Brazil, September 26, 2002.
- HAUSER G., PROCTOR W., 1993. Performance of prototype aerating weirs downstream from TVA Hydropower dams, *Proc. Natl. Conf. Hydraul. Eng.*, San Francisco, ASCE, 99 p.
- LACAUX C., 1996. Modifications des échanges de constituants mineurs atmosphériques liés à la création d'une retenue hydroélectrique. Impact des barrages sur le bilan du méthane dans l'atmosphère, Th. Doct. Univ. Toulouse III, France, 210 p.
- RICHARD S., 1996. La mise en eau du barrage de Petit Saut. Hydrochimie 1- du fleuve Sinnamary avant la mise en eau, 2- de la retenue pendant la mise en eau, 3- du fleuve en aval, Th. Doct. Univ. Marseille I, France, 278 p.
- RICHARD S., ARNOUX A., CERDAN P., 1997. Évolution de la qualité physico-chimique des eaux de la retenue et du tronçon aval depuis le début de la mise en eau du barrage de Petit Saut. *Hydroécol. Appl.*, 9, 57-83.
- RICHARD S., GALY-LACAUX C., ARNOUX A., CERDAN P., DELMAS R., DUMESTRE J.F., GOSSE Ph., LABROUE L., SISSAKIAN C., HOREAU V., 2000. Evolution of physico-chemical water quality and methane emissions in the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 27, 1454-1458.
- RICHARD S., CERDAN P., 2002. Méthane dissous et oxygène dissous dans la retenue et en aval du barrage de Petit Saut en 2002, Hydréco/EDF-CD Guyane, *Rapport Scientifique*, 16 p.
- RICHARD S., CERDAN P., 2003. Enlèvement partiel du seuil oxygénant en aval du barrage de Petit Saut en 2001 – Conséquences sur la qualité des eaux à l'aval, Hydréco/EDF-CD Guyane, *Rapport Scientifique*, 22 p.