Dispositif de réoxygénation artificielle du Sinnamary à l'aval du barrage de Petit-Saut (Guyane)

*Artificial re-oxygenation of the Sinnamary,
downstream of Petit-Saut dam (French guiana)*

Ph. Gosse⁽¹⁾ et A. Grégoire⁽²⁾

(1) *Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Département Environnement,
6, quai Watier, F-78401 Chatou cedex, France.*

(2) *Electricité de France, Centre National d'Equipement Hydraulique Savoie – Technolac,
F-73373 Le Bourget-du-Lac cedex, France.*

Résumé. – Au début de l'entrée en fonctionnement de la centrale hydroélectrique de Petit-Saut, l'eau, à l'aval des turbines, était totalement anoxique. De plus, une forte désoxygénation se produisait au fil de l'eau, lorsque l'on mélangeait cette veine d'eau avec de l'eau réoxygénée provenant des pertuis de fond du barrage.

L'analyse comparative de l'eau issue des évacuateurs de fond avec celle turbinée a montré que cette dernière se différenciait non seulement par une absence d'oxygène dissous mais aussi par une plus grande richesse en méthane dissous. C'est ce gaz réducteur qui est apparu comme le principal consommateur d'oxygène dissous le long du cours du Sinnamary.

Devant cette situation et afin de concilier la production d'électricité et le maintien de la vie aquatique, Electricité de France a étudié la faisabilité d'un dispositif capable à la fois de réoxygéner l'eau et d'éliminer les gaz réducteurs.

La construction, dans le canal de fuite de la centrale, d'un seuil à deux lames déversantes, a satisfait au principal critère requis : maintenir en permanence à l'aval du barrage de Petit-Saut une teneur en oxygène dissous supérieure à 2 mg/l.

Mots clés. – Seuil oxygénant, aménagement hydroélectrique, méthane, cours d'eau tropical.

Abstract. – As soon as the Petit-Saut hydroelectric power station was commissioned, the water downstream from the turbines became completely anoxic. In addition, progressive run-of-water de-oxygenation was taking place, as this anoxic vein of water mixed in with the re-oxygenated water from the bottom sluices of the dam.

Comparative analysis of the water from the bottom outlets and the turbinated water showed that the latter had not only a lack of dissolved oxygen but also a high methane content. It is this reducing gas which is the main oxygen consumer along the Sinnamary river. In order to reconcile power production with preservation of aquatic systems, Electricité de France built a weir with optimal characteristics that would create maximum turbulence to encourage re-oxygenation and methane degassing in the tailrace channel.

The weir gives good results, with dissolved oxygen concentrations higher than 2 mg/l in the downstream river for turbinated discharge up to 250 m³/s.

Key Words. – Oxygenation weir, hydroelectric power station, tropical river, methane.

1 INTRODUCTION

Dans la plupart des barrages réservoirs édifiés en zone tropicale, il a été observé que la composition chimique de l'eau était caractérisée, les premières années, par un important déficit en oxygène dans les couches profondes, par des concentrations élevées en sels azotés et phosphorés et en général par des basses valeurs du pH.

La principale cause de cette situation est la décomposition de la végétation submergée, processus qui utilise l'oxygène dissous dans l'eau. La reminéralisation concomitante est à l'origine de la libération des éléments chimiques constitutifs de la biomasse végétale immergée. Les processus sont d'autant plus durablement marqués que la biomasse végétale ennoyée est importante et, comme le montre le retour d'expérience en Afrique et en Amérique du Sud, que le temps de renouvellement est long. En profondeur, la décomposition anaérobie de la matière organique submergée conduit à la

formation, au fond du lac, d'éléments dissous comme : l'ammonium (NH₄⁺), le fer ferreux (Fe⁺⁺), le méthane (CH₄), le gaz carbonique (CO₂) et l'hydrogène sulfuré (H₂S).

La création de la retenue de Petit-Saut, en Guyane, a entraîné l'immersion d'environ 310 km² de forêt primaire représentant de l'ordre de 8 millions de tonnes de carbone, liitière comprise.

Les premières dispositions prises pour limiter la dégradation de la qualité chimique de l'eau ont été les suivantes :

- traitement des rejets pendant la période de chantier, (station d'épuration, bassins de décantation, bacs déshuileurs...);

- restitution d'un débit réservé élevé à l'aval du barrage pour maintenir le pouvoir de dilution du cours d'eau et limiter les risques de remontées du coin salé. Ce débit réservé (80 m³/s) est égal au 1/3 du débit moyen annuel et a été de 100 m³/s pendant la phase de remplissage du réservoir qui a duré 18 mois, de janvier 94 à juin 95;

— mise en place de dispositions constructives en vue d'augmenter la teneur en oxygène dissous de l'eau restituée au barrage :

— la configuration des pertuis de fond utilisés pour le passage initial du débit réservé a été conçue de manière à favoriser un brassage eau-atmosphère important ;

— en phase d'exploitation normale, les débits supplémentaires non turbinés peuvent être évacués par les ouvrages de « surface », le clapet (pour les cinq premiers mètres de la colonne d'eau) et le déversoir de crue ;

— une digue de 22 mètres de haut, placée une centaine de mètres en amont des turbines, destinée à arrêter les eaux de fond de moins bonne qualité.

Pour suivre l'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau pendant la durée du remplissage (18 mois), 25 paramètres ont été pris en compte se-

lon des fréquences de mesure différentes en des points situés en amont et en aval du barrage (S. Richard, 1996). Le programme de mesure pour le bief aval (fig. 1 et tableau I) compris entre le barrage et l'entrée de l'estuaire (Pointe-Combi) était le suivant :

— les teneurs en oxygène, la température et la conductivité étaient mesurées au moins une fois par semaine en une dizaine de points et au moins une fois par jour en 2 points ; de juin à septembre 1994 (période d'essais des turbines) ces investigations concernaient également l'estuaire.

Les valeurs de ces mêmes paramètres, ainsi que le pH, étaient enregistrés en continu en 2 stations automatiques (MOAMED) situées au pied du barrage et à Pointe-Combi, 40 km plus à l'aval ;

— les principaux sels nutritifs (azotés, phosphorés, silice), différentes formes de la matière organique (DBO,

Tableau I. — Caractéristiques des stations de mesures.

Table I. — Characteristics of the measuring stations.

Stations	Points kilométriques Rapport barrage	Caractéristiques
Chenal de fuite des turbines	0,1	Eau turbinée avec ou sans le clapet de surface
Chenal des évacuateurs de fond	0,1	Eau réoxygénée par remous
Aval confluence des chenaux de fuite usine et des évacuateurs de fond	0,8	Veine d'eau turbinée
	0,8	Veine d'eau réoxygénée par évacuateurs de fond
	0,8	Mélange des 2 veines
Kerenroch	7	Saut (zone de réhaussement du lit : zone de bon mélange)
Crique Chapeau	12	Aval affluent
Crique Vénus	23	Aval affluent
Roche Bravo	31	Point intermédiaire
Pointe Combi (MoAMED)	40	Début de l'estuaire
Estuaire : 8 points	48 à 65	Echelonnés le long de l'estuaire
Embouchure	67

Fig. 1. – Localisation des stations de mesures dans le tronçon du Sinnamary aval barrage. (D'après S. Richard, 1996).
Fig. 1. – Location of measuring stations in the stretch of the Sinnamary river downstream from the dam (from S. Richard, 1996).

DCO), le potentiel Redox, le fer, les pigments chlorophylliens, les M.E.S.... étaient mesurés bimensuellement.

Ce protocole a été utile pour bien évaluer la situation en temps réel et conforter les décisions prises pour maintenir oxygéné le Sinnamary aval.

2 ÉVOLUTION DE L'OXYGÉNATION DU SINNAMARY À L'AVAL DU BARRAGE, AVANT CONSTRUCTION DU SEUIL AÉRATEUR

2.1 Avant turbinage

La mise en eau de la retenue de Petit-Saut sur le fleuve Sinnamary en Guyane a débuté en janvier 1994. Pendant les cinq premiers mois de cette phase, seul le 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 (fig. 2) apparaissant dans un milieu peu profond (environ 1 m) entraînent un brassage important de l'eau; cette situation permettait une réoxygénation de l'eau jusqu'au niveau d'équilibre avec l'atmosphère, environ 8 mg/l pour les températures de l'eau observées (de l'ordre de 25 °C) (fig. 3).

Ainsi, l'oxygénation de l'eau du Sinnamary, dans le tronçon aval barrage, est demeurée compatible avec la vie aquatique durant les 5 mois précédant le démarrage des turbines. Toutefois, comme l'illustre la figure 5, les analyses physico-chimiques effectuées le

long du fleuve, jusqu'à l'entrée de l'estuaire, à Point Combi, montraient une décroissance systématique de l'ordre de 3 à 4 mg/l, des teneurs en oxygène dissous sur 40 km.

Cette diminution voulait donc dire que sur le parcours aval, la consommation en oxygène dissous dans la rivière, d'origine biologique et chimique, était supérieure aux apports d'oxygène par échange physique à l'interface eau-atmosphère. Par une étude plus fine des bilans, on sait aujourd'hui que les échanges physiques à l'interface eau-atmosphère sont faibles dans le Sinnamary. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le Sinnamary est relativement profond (plus de 3 mètres en moyenne) et que l'état de sa surface (épisodes de pluie exceptés) est parfaitement lisse, du fait d'une pente extrêmement faible du lit (moins de 0.003 %) et de l'absence de vent au dessus de la rivière (voir annexe).

2.2 Après turbinage

On savait que faute de turbulence générée à l'interface eau-atmosphère, l'eau turbinée qui sort au pied du barrage en rive droite, à l'altitude - 10 m NGG et débouche en écoulement noyé dans un milieu profond, n'aurait pas la possibilité de s'oxygéner dans le canal de sortie de l'usine qui rejoint la rivière 300 mètres en aval (fig. 3).

Pour pouvoir turbiner de l'eau anoxique sans perturber le milieu aquatique récepteur, il fallait donc faire un mélange, à la sortie du barrage, entre l'eau oxygénée, restituée

Fig. 2. – Visualisation de la forme de l'écoulement à la sortie du barrage.

2a. – Canal de fuite de la centrale en période de turbinage.

2b. – Sortie des évacuateurs de fond avec jet et ressaut hydraulique.

Fig. 2. – View of the form taken by the flow at the outlet from the dam.

2a. – Tailrace channel with the power station in generating mode.

2b. – Discharge from the bottom outlet with hydraulic jump and jet.

Fig. 3. – Distribution des teneurs en oxygène dans le Sinnamary au pied du barrage et jusqu'à 0,8 km en aval, avant construction du seuil oxygénant.

Fig. 3. – Distribution of oxygen contents in the Sinnamary river at the dam toe and to a distance of 0.8 km downstream, before construction of the oxygenating weir.

par les pertuis de fond, et l'eau désoxygénée, transitant par les turbines. L'objectif était de créer, dans les premiers kilomètres à l'aval du barrage, une veine d'eau suffisamment oxygénée.

Compte tenu du profil amont aval d'O₂ dissous avant les essais de turbinage, on pouvait s'attendre, a priori, à ce qu'un rapport de mélange de 1 suffise pour dépasser 2 mg/l d'oxygène dissous à Pointe-Combi, niveau de base cible admis par le Comité Scientifique de Petit-Saut.

Or, les premiers essais de juin avec un débit turbiné de 40 m³/s, ont montré qu'il fallait un rapport débit vannes de fond / débit turbiné supérieur à 1,5 (c'est-à-dire un débit restitué par les vannes de fond supérieur à 60 m³/s) pour garantir 2 mg/l d'oxygène dissous à Pointe-Combi.

Les essais ultérieurs de turbinage étalés de juillet à septembre 1994 montraient que ce rapport de dilution devait être de plus en plus élevé à mesure que le temps avançait (de 1,5 début juin jusqu'à 4 début septembre).

Il n'y avait qu'une explication plausible à ce phénomène (Gosse, 1994) : tout d'abord, le brassage de l'eau en sortie des vannes de fond avait une autre vertu, celle d'éliminer un ou des gaz dissous formés dans les couches désoxygénées du réservoir et dont la dégradation en milieu oxygéné demandait plusieurs mg/l d'oxygène dissous; d'autre part la teneur de ce ou ces gaz avait beaucoup augmenté entre juin et septembre. On a mis en évidence que le méthane était le gaz en cause.

Pendant les périodes de turbinage, le Sinnamary aval pouvait être subdivisé en 3 tronçons fonctionnant de façon différente.

2.2.1 Du barrage à Kerenroch

Le cours d'eau, dans ce tronçon, présente une hétérogénéité transversale très marquée en période de turbinage (fig. 4).

Dans une large gamme de débit, les 2 veines d'eau issues respectivement des évacuateurs de fond (rive gauche) et des turbines (rive droite) restent individualisées pendant plusieurs kilomètres. Le bon mélange est obtenu, dans la majorité des situations, à Kerenroch situé 7 km plus à l'aval dans une zone à rocher émergeant qui parachève le mélange des masses d'eau.

Afin d'apprécier l'action du turbinage sur le niveau d'oxygénation atteint au bon mélange, une analyse de corrélation entre les teneurs en oxygène mesurées à Kerenroch et les caractéristiques du turbinage, a été effectuée. Les eaux turbinées étant totalement désoxygénées, pour des raisons de sauvegarde de la vie aquatique, aucune expérience n'a pu être menée sans dilution préalable avec l'eau transitant par les pertuis de fond.

En période de turbinage, les teneurs en oxygène à Kerenroch, s'avèrent très bien corrélées à l'importance du débit d'eau turbiné (fig. 6). Les coefficients de corrélation obtenus sont respectivement :

— de 0,84 pour le rapport débit turbiné / débit total restitué (tur-

Fig. 4. – Distribution des teneurs en oxygène dans le Sinnamary aval, entre le barrage et Kerenroch, avant construction du seuil oxygénant.

Fig. 4. – Distribution of oxygen contents in the Sinnamary river between the dam toe and Kerenroch, before construction of the oxygenating weir.

bines + évacuateurs de fond + clapet de surface éventuellement),

— 0,78 pour le débit turbiné.

La teneur en oxygène à Kerenroch est la résultante des seuls phénomènes de consommation qui se produisent sur le tronçon, l'influence des apports intermédiaires étant négligeable. Les mesures effectuées de juin à septembre indiquent que la perte en oxygène, sur ce tronçon, a été en moyenne 1,5 mg/l, avec une valeur de 0,5 mg/l sans turbinage.

2.2.2 De Kerenroch à Pointe-Combi et Sinnamary (fig. 5)

Dans ce tronçon, le milieu est homogène sur la transversale. Les phénomènes de réaération par l'atmosphère, ainsi que de production et de consommation d'oxygène par la photosynthèse des algues, sont demeurés très faibles. Ainsi les variations d'oxygène à Pointe-Combi ne pouvaient s'expliquer que par les paramètres plus fluctuants : la qualité de l'eau du réservoir au droit du barrage,

	Vélie	Jour
Turbine :		
durée en heures	24	24
débit en m ³ /s	60	50
Evacuateur (m ³ /s) :		
	140	120
Débit turbine/Débit total (%) :	30	29

Pluviosité 24 h : 10 mm

Marée basse

Fig. 5. — Distribution des teneurs en oxygène dans le Sinnamary aval, entre le barrage et l'estuaire, avant construction du seuil oxygénant.

Fig. 5. — Distribution of oxygen contents in the Sinnamary river between the dam toe and the estuary before construction of the oxygenating weir.

le mode de restitution de cette eau à l'aval, le volume des apports intermédiaires.

Entre Kerenroch et Pointe-Combi, pour des temps de transit des masses d'eau (entre 24 et 48 heures pour des débits relâchés au barrage compris entre 100 et 300 m³/s), la baisse moyenne d'oxygène en septembre 1994 était de l'ordre de 3 mg/l sans turbinage, avec des valeurs plus élevées en turbinage.

Rôle des apports

Les fortes précipitations, qui modifient le régime des affluents, peuvent modifier temporairement le bilan en oxygène du Sinnamary, en rappro-

chant la teneur en O₂ dissous de la valeur de saturation.

Rôle de la marée

Dans l'évaluation de la consommation en oxygène dissous à l'entrée de l'estuaire, il faut prendre en compte le rôle de la marée hydraulique qui freine ou accélère l'écoulement des masses d'eau et qui peut conduire à des inversions temporaires de vitesse dans le secteur aval.

2.2.3 Estuaire

Les relevés dans l'estuaire ont montré un niveau d'oxygène dissous toujours meilleur qu'à Pointe-Combi, même en période de turbinage.

Corrélation entre la concentration en O₂ à Kerenroch et le pourcentage d'eau turbinée

Fig. 6. – Corrélation entre la concentration en oxygène dans le Sinnamary à Kerenroch et le débit turbiné.
Fig. 6. – Correlation between oxygen content in the Sinnamary at Kerenroch and the discharge from the turbines.

3 MISE EN ŒUVRE DE LA RÉOXYGÉNATION ARTIFICIELLE

3.1 Caractéristique physico-chimique de l'eau au droit des différents ouvrages de restitution

3.1.1 Eau transitant par les évacuateurs de fond

L'eau est sous-tirée au fond de la retenue (à 0 mètre NGG pour une cote maximale de surface de 35 mètres) en s'engouffrant dans des pertuis de 7×7 mètres de section, fermés par des vannes réglant le débit. Elle est totalement désoxygénée mais les remous créés par la configuration particulière des évacuateurs, permettent un important dégazage de gaz réducteurs dissous (hydrogène sulfuré, méthane...) et une réoxygénation pratiquement à saturation; cette eau reste cependant très chargée en matière organique.

3.1.2 Eau transitant par le clapet de surface

Le clapet de surface d'une hauteur de 4,5 mètres, peut fonctionner à partir de la cote 30,50 m.

Au pied de la chute créée par le clapet, l'eau est saturée en oxygène et dépourvue de méthane. La masse d'eau transitant par cet ouvrage présente, de loin, les caractéristiques physico-chimiques les meilleures, relativement aux autres débits d'eau restitués.

3.1.3 Eau turbinée

Prélevée un peu moins en profondeur dans le réservoir que l'eau des

évacuateurs de fond, cette eau reste totalement désoxygénée à la sortie du barrage, riche en matière organique et en composés réduits.

La comparaison entre la composition physico-chimique de l'eau évacuée par les pertuis de fond et celle turbinée, a servi de point de départ à la recherche d'une solution permettant de faire fonctionner l'usine tout en maintenant une oxygénation du Sinnamary aval compatible avec la vie aquatique.

Les seuls paramètres significativement discriminants entre les 2 veines d'eau étaient les teneurs en gaz dissous, oxygène et 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.

3.2 Rôle du méthane dans le bilan en oxygène du Sinnamary aval

Le rôle du méthane sur les baisses d'oxygène dissous du Sinnamary aval a pu être démontré de façon chronologique par les faits suivants :

— il existe une relative concordance entre les teneurs en méthane dans l'eau turbinée estimées par un modèle d'oxygène dissous du Sinnamary aval (Gosse, 1994) et celles révélées, par la suite, par les mesures. Les calculs conduisaient à l'hypothèse d'une teneur en méthane dissous proche de 10 mg/l dans l'eau turbinée en août et début septembre 1994, en

supposant (sur la base de données bibliographiques de laboratoire obtenues à des températures plus basses qu'à Petit-Saut) une dégradation à peu près du tiers de ce gaz sur le parcours barrage – Pointe-Combi parcouru en près de 2 jours à $100 \text{ m}^3/\text{s}$; les mesures du laboratoire d'Aérologie de l'Université de Toulouse ont révélé que la teneur en méthane était de 3 mg/l début septembre et que sa dégradation dans la rivière devait être très rapide puisque l'on n'en trouvait pas à Pointe-Combi;

— les mesures du laboratoire d'Aérologie de l'Université de Toulouse indiquent que les échanges de méthane entre l'eau et l'atmosphère le long du Sinnamary aval (la teneur en méthane à la sortie du barrage était alors voisine de 1 mg/l) contribuent pour moins de 20 % à la disparition du méthane de l'eau sur ce parcours (Galy-Lacaux et al., 1995). Cette information permettait de conforter l'hypothèse d'une dégradation du méthane au sein de la colonne d'eau et du même coup de montrer la faiblesse des échanges d'oxygène dissous entre l'eau et l'atmosphère, le taux de sous-saturation de l'oxygène dans la rivière par rapport à l'équilibre atmosphérique étant très inférieur au taux de sursaturation du méthane;

— les mesures du laboratoire d'Hydrobiologie de l'Université de Toulouse montreront par la suite, un accroissement amont-aval sensible du peuplement de bactéries méthanotrophes lorsqu'il y a du méthane dans le Sinnamary aval (Dumestre et

Labroue, 1996), révélant ainsi une oxydation biologique du méthane.

Notons, à ce sujet, que l'étude de Petit-Saut constitue la première référence permettant d'une part d'indiquer la dynamique d'évolution du méthane dans l'eau d'un barrage – réservoir inondant une forêt tropicale, d'autre part de mettre en relief le rôle de ce gaz dans la diminution de la teneur en oxygène dissous de la rivière aval (voir annexe).

L'oxydation du méthane d'origine hypolimnique restitué à l'aval du barrage se fait en moins de 48 heures dans ce milieu à 25°C ; 1 mg/l de méthane crée un puits d'oxygène dissous proche de 3 mg/l dans le Sinnamary aval. Ainsi, à la fin de l'été 1994, en concordance avec la forte augmentation des teneurs en méthane entre juin et septembre dans la colonne d'eau de la retenue (Gosse, 1994), les teneurs en oxygène à Pointe-Combi sont devenues inférieures à 2 mg/l malgré une dilution 4 pour 1 avec de l'eau oxygénée au barrage. Pour sauvegarder la vie aquatique, EDF a dû alors interrompre le turbinage.

Dans la recherche des solutions à mettre en œuvre pour résoudre ce problème, le principe à respecter était non seulement de réoxygéner l'eau turbinée mais aussi d'éliminer tout ou partie des gaz réducteurs et principalement le méthane. Il fallait, pour le moins, reproduire la situation existant lorsque l'eau de la retenue était évacuée seulement par les pertuis de fond.

3.3 Choix du système de réaération

Plusieurs solutions étaient théoriquement envisageables pour apporter de l'oxygène dissous dans l'eau turbinée qui en était dépourvue :

a) injection sous pression de bulles d'air ou d'oxygène pur à l'entrée des turbines ou dans le petit volume d'eau de 250 000 m³ du réservoir compris entre le barrage et la digue amont dont la crête est à l'altitude de 22 mètres,

b) entraînement d'air extérieur dans la dépression créée à la sortie des turbines (principe de la pompe à vide),

c) surélévation de la digue de 22 mètres pour sélectionner davantage d'eau de surface du réservoir, celle-ci étant de meilleure qualité,

d) injection sous pression de bulles d'air ou d'oxygène pur en aval du barrage dans la partie amont du canal de sortie de l'usine, la profondeur d'eau importante à cet endroit permettant d'envisager une bonne efficacité des diffuseurs placés au fond du canal,

e) installation d'un seuil à lame déversante dans le canal de sortie de l'usine ou dans la rivière dans le proche aval du débouché du canal, voire plus près de Pointe-Combi, là où les concentrations d'oxygène dissous dans la rivière sont les plus basses; la fonction de la lame déversante est d'entraîner des bulles d'air dans l'eau et de permettre un maintien suffisant de celles-ci dans l'eau pour assurer

leur dissolution et donc un apport d'oxygène dissous.

Les solutions a, b et c ont été abandonnées. L'inconvénient majeur de la première était la difficulté d'intervention en cas de problème de fonctionnement du dispositif et le risque de détérioration par des branches ou troncs d'arbres morts. La solution b qui affectait directement le rendement des turbines demandait un percement d'accès en sortie de turbine. Le succès de la solution c n'était pas garanti compte tenu de la très faible épaisseur de la couche oxygénée et du gradient modéré de densité sur la verticale.

La mise en œuvre des solutions d) et e) a finalement été décidée en septembre 1994, la société française Aquatechnique étant retenue pour concevoir le dispositif d), EDF prenant en charge celle du seuil.

Apporter de l'oxygène dissous à l'eau turbinée était une chose, mais on a vu l'importance qu'il y avait aussi à éliminer le méthane dissous, gaz qui constituait une demande en oxygène dissous de plus de 20 mg/l fin septembre!

Il était clair que de tels dispositifs conçus pour rapprocher le niveau d'oxygène dissous de l'eau de la valeur d'équilibre avec l'atmosphère (8 mg/l) auraient aussi pour effet d'éliminer du méthane dissous dont les teneurs dans l'eau étaient très supérieures au niveau d'équilibre avec l'atmosphère (moins de 0,1 mg/l). Mais il était très difficile de donner des éva-

Fig. 7. – Evolution des teneurs en oxygène dans le Sinnamary aval à Pointe Combi durant les quatre premiers mois de 1995.

Fig. 7. – Changes in oxygen contents in the Sinnamary downstream at Pointe Combi during the 4 first months of 1995.

luations chiffrées d'élimination; en effet, d'une part prévoir le gain d'oxygène dissous n'est pas simple (voir chapitre suivant), d'autre part la mise en œuvre de dispositifs avec l'intention d'éliminer du méthane de l'eau d'une rivière était vraisemblablement une première.

Où installer le seuil à lame déversante? Il était à première vue tentant d'apporter de l'oxygène dissous là où il manquait le plus, c'est-à-dire relativement loin en aval du barrage. Cependant, compte tenu de la demande en oxygène due au méthane qui

devenait de plus en plus élevée dans l'eau turbinée après juin 1994 – cette demande s'exprimant en moins de 48 heures – il devenait absolument prioritaire d'éliminer ce méthane le plus près possible du barrage. EDF a donc décidé d'installer le seuil dans le canal de sortie de l'usine, solution qui était nettement préférable pour plusieurs autres raisons à celle d'une installation dans la rivière dans le proche aval du débouché du canal: meilleure résistance aux crues, absence d'obstacles en rivière, contrôle aisé de l'accès près de la chute.

3.4 Principaux critères de dimensionnement du seuil aérateur

3.4.1 Facteurs économiques

La principale contrainte d'ordre économique était d'installer un système opérationnel dans des délais aussi courts que possibles. Ceci exigeait la remise d'un plan du seuil pour fin octobre 1994, pour que ce dernier soit opérationnel début mars 1995 et que des tests d'efficacité en fonction du débit turbiné et du degré d'utilisation du dispositif Aquatechnique soient réalisés au cours des deux mois suivants.

3.4.2 Contraintes d'exploitation de la centrale

Pour que la centrale puisse fonctionner correctement, il était demandé que la cote de surface de l'eau dans le canal de sortie ne dépasse pas 8,2 m NGG pour un débit de 680 m³/s alimentant le canal (comportant le débit maximal turbinable de 440 m³/s et le débit en provenance du clapet de surface du réservoir).

Cette contrainte majorait le surélévement possible de la surface de l'eau dans le canal à près de 2,5 mètres à ce débit et près de 5,5 mètres pour un débit de 110 m³/s (débit maximal turbinable d'un groupe).

3.4.3 Contraintes de génie civil

Parmi les critères de génie civil devaient être considérés, la stabilité et la durée de vie de la structure ainsi que la possibilité de construire assez rapidement le seuil en tenant compte de l'éloignement de la métropole.

3.4.4 Aspects scientifiques

Les limites de la connaissance

Il n'existe pas de modèle général satisfaisant permettant de prévoir précisément l'effet oxygénant d'un ouvrage hydraulique conçu pour réoxygéner l'eau qui le franchit, que cet ouvrage soit un seuil à lame déversante, une série de marches d'escalier ou un seuil à lame noyée générant un ressaut.

La raison première est que la dynamique de formation, d'entraînement et de dissolution des bulles d'air au contact de l'eau est difficile à mettre en équation, d'autant qu'un grand nombre de paramètres ont une influence sur ces processus : la hauteur de chute, le débit de l'écoulement, la forme du bassin de réception de la chute, la température de l'eau, les matières dissoutes et particulières transportées.

Les données disponibles dans la bibliographie sur l'oxygénation de l'eau dans des chutes ou ressauts ont été obtenues essentiellement sur des modèles physiques qui sont peu transposables sur site en raison de problèmes de similitude comme la taille des bulles ou les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. On observe ainsi une grande dispersion des résultats donnés par les formules d'oxygénation de chutes d'eau proposées dans la bibliographie, qui ne prennent généralement en compte que la hauteur de chute et la température de l'eau (figure 8).

Pour dessiner le seuil sur des critères scientifiques, l'avis d'expert est

donc primordial. Dans notre démarche, nous avons tenu compte des réalisations de ce type dans le monde et des principaux facteurs physiques jusqu'ici identifiés comme importants.

Fig. 8. – Mesure de l'effet d'oxygénation d'une chute d'eau de barrage. Représentation des déficits d'oxygène mesurés en amont et en aval de barrages de la Moselle, en aval du confluent de la Meurthe. Comparaison avec 3 formules de la bibliographie (Gosse, 1986).

Fig. 8. – Measurement of the effect of oxygenation of water falling from a dam. Representation of oxygen deficits measured upstream and downstream from the dams on the Moselle, downstream from the confluence of the Meurthe. Comparison with three formulae taken from the literature (Gosse, 1986).

Les réalisations précédentes

La synthèse de l'EPRI publiée en 1990 sur les techniques de réoxygénation ne citait qu'un cas concret de réalisation dans le Texas sur la rivière Guadeloupe au site de Canyon dam. Cet ouvrage en forme de W allongé (dit labyrinthe) a une longueur de crête de 34 mètres pour une section transversale de l'écoulement de 12 mètres et donne une hauteur de chute de l'ordre de 1,5 m pour la gamme des débits turbinés (2 à 18 m³/s). Il permet de gagner 5 mg/l d'oxygène dissous à partir d'une eau qui en est dépourvue.

La TVA (Tennessee Valley Authority) a également construit deux seuils oxygénateurs (Hauser et Proctor, 1993), un seuil labyrinthe en aval du barrage de South Holston (en décembre 1991) et un seuil plus sophistiqué dit « infuser » en aval du barrage de Chatuge (en novembre 1992). Leurs caractéristiques et dessins sont reportés sur le tableau II et la figure 9.

Tableau II. – Caractéristiques des seuils aérateurs construits par TVA en aval des réservoirs de South Holston et Chatuge.

Table II. – Characteristics of the aeration weirs built by the TVA downstream from the South Holston and Chatuge reservoirs.

	South Holston Labyrinthe	Chatuga Infuser
Distance en aval du barrage (km)	1,9	1,2
Section transversale de l'écoulement	104	35
Hauteur du seuil (m)	2,3	2,9
Longueur de crête (m)	640	30,8
Hauteur de chute en turbinage (m)	1,4	1,8
Débit turbiné (m ³ /s)	68	37
Débit spécifique (m ² /s)	0,11	1,2
Hauteur de la lame en turbinage (m)	0,15	0,76
Profondeur du bassin de réception en turbinage	1,1	1,8

Fig. 9. – Configuration de 3 seuils oxygénants construits aux Etats-Unis en aval de barrages hydroélectriques. **9a.** – Canyon Dam. **9b.** – Trois arcs du seuil «labyrinthe» de South Holston. **9c.** – Seuil «infuser» de Chatuge.

Fig. 9. – Layout of three oxygenating weirs built in the USA downstream of hydroelectric dams. **9a.** – Canyon Dam. **9b.** – Three arches of the "labyrinth" weir at South Holston. **9c.** – "Infuser" weir at Chatuge.

La forme du seuil-labyrinthe découle du souhait de réduire le plus possible le débit spécifique (et donc l'épaisseur de la lame déversante) pour favoriser le nombre de bulles d'air entraînées par unité de volume et « empêcher des conditions de recirculation hydraulique au pied du seuil. 60% du déficit amont en oxygène dissous (à la valeur d'équilibre avec l'atmosphère) peut être comblé avec le seuil de South Holston pour une température d'eau inférieure à 9 °C.

Le seuil « infuser » muni de fentes transversales sur sa crête tablier permet de disposer de rideaux d'eau plus turbulents qu'une chute normale. Une chambre sous le tablier est ventilée par l'intermédiaire de 5 conduits permettant à l'air renouvelé de s'écouler autour des rideaux d'eau. Ce seuil permet de combler 68% du déficit amont en oxygène pour une hauteur de chute de 1,8 mètres.

Les facteurs physiques à privilégier

Un certain nombre de caractéristiques physiques jouant un rôle significatif sur l'oxygénation de l'eau dans une chute ont été identifiées (Avery et Novak, 1978; Thron et al., 1979; Hanisch, 1980; Gosse et Salleron, 1986; Nakasone, 1987; Rindel et Gulliver, 1990; Hauser et Brock, 1993; Hauser et Proctor, 1993) :

- la hauteur de chute ou différence d'altitude de la surface de la colonne d'eau à l'amont et à l'aval du seuil. La concentration d'oxygène dissous d'équilibre avec l'atmosphère a d'autant plus de chance d'être atteinte que la hauteur de chute est grande;

- la forme du bassin de réception de la chute. Elle est importante car les échanges de gaz entre l'eau et l'atmosphère dans le bassin peuvent y être plus efficaces que dans la chute elle-même. Il faut que les bulles d'air entraînées dans la chute d'eau s'enfoncent dans la masse d'eau aval et y restent suffisamment longtemps pour favoriser les échanges de gaz dans le contact air-eau;

- l'épaisseur de la lame déversante lors du franchissement de la crête du seuil. Elle ne doit être ni trop mince ni trop épaisse : si elle est trop mince, l'entraînement des bulles d'air dans l'eau risque de ne pas se faire suffisamment en profondeur, si bien que le temps de contact air-eau dans le bassin de réception risque d'être trop court; si elle est trop épaisse, la quantité de bulles d'air entraînées par unité de volume d'eau risque d'être faible;

- la présence d'obstacles ou dispositifs favorisant la cassure de la nappe d'eau tombante et l'entrée d'air autour d'elle.

3.4.5 Conception du seuil

Pour aider à la conception du seuil, EDF a décidé de tester sur maquette physique plusieurs solutions imaginées : il ne s'agissait pas d'évaluer des flux d'échange gazeux entre l'air et l'eau – le temps imparti et les problèmes de similitude ne s'y prêtaient pas – 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. Cet examen sur maquette a été

réalisé avec le Laboratoire National d'Hydraulique en utilisant un canal aménagé reproduisant le canal de sortie de l'usine aux échelles 1/40^e et 1/23^e. Ce canal avait des parois latérales vitrées permettant de bien visualiser l'entraînement des bulles d'air.

Après des premiers tests sur des seuils rectilignes et en labyrinthe à une seule lame déversante, le choix s'est assez vite porté sur un seuil à deux chutes successives, dont l'intérêt était double :

- création d'une chute amont dont la hauteur atteignait 2 à 3 mètres et correspondait ainsi à la gamme de hauteur pour laquelle l'efficacité d'aération par unité de hauteur est jugée très bonne par la bibliographie (Thron *et al.*, 1979; Hanisch, 1980),

- création d'un bassin de réception entre les deux chutes, dont la pro-

fondeur et le volume pouvaient être choisis.

Une fois le projet suffisamment avancé sur la base de la considération des critères scientifiques, l'équipe génie civil du Centre National d'Équipement Hydraulique (CNEH) est intervenue pour affiner le dessin du seuil que l'on a décidé d'installer 150 mètres en aval du barrage avec une forme en hexagone : figures 10 à 12.

La rencontre avec des experts de la TVA, G. Hauser et T. Alavian, fin octobre 1994 a permis de conforter l'option retenue sous l'aspect oxygénation. Les principaux critères de dimensionnement ont été passés en revue :

- la hauteur d'eau dans le bassin de réception de la première chute apparaissait convenable car elle était proche de la profondeur maximale

A 110 (220) m³/s, z amont = 6.50 (6.90) m,
z inter = 4.0 (4.4) m, z aval = 1.10 (2.40) m.

Fig. 10. — Configuration du seuil oxygénant de Petit-Saut : coupe transversale.

Fig. 10. — Oxygenating weir at Petit Saut: cross section.

Fig. 11. – Vue d'un bassin de réception (hexagone) du seuil oxygénant de Petit-Saut.
Fig. 11. – View of a receiving basin (hexagon) at the Petit-Saut oxygenating weir.

d'entraînement des bulles d'air dans l'eau (2,5 à 3 mètres),

— le volume du bassin de réception de la première chute était relativement correct sur la base du temps de séjour des masses d'eau : on peut en effet considérer que la vitesse ascensionnelle des bulles d'air dans l'eau est de $1/3$ m/s. S'il est bien optimisé, le bassin doit être tel qu'une bulle ait le temps de partir du fond pour atteindre la surface, avant que l'eau ne franchisse la deuxième chute. 9 secondes serait ainsi le temps de séjour minimal souhaitable de l'eau dans le bassin, étant entendu qu'une forte turbulence est de nature à augmenter encore ce temps. Comme le

volume total des hexagones est proche de $2\,500\text{ m}^3$, le temps de séjour des masses d'eau dans les hexagones est voisin de 25 secondes pour un débit de $100\text{ m}^3/\text{s}$ et de 12 secondes pour $250\text{ m}^3/\text{s}$ valeur proche du débit moyen annuel du Sinnamary,

— les pieux verticaux situés aux coins amont des hexagones permettait des entrées d'air sous la chute.

Sur les conseils des ingénieurs de TVA, EDF a installé de nombreux plots horizontaux en crête de la chute amont pour morceler la lame déversante (effet visible sur la figure 12). Toutefois, les risques de déstabilisation de la structure du seuil n'ont pas permis l'installation d'une longueur

Fig. 12. — Vues du seuil oxygénant de Petit-Saut.
Fig. 12. — Views of the Petit-Saut oxygenating weir.

Fig. 12a. — Avant mise en service. En arrière-plan le batardeau provisoire mis en place pour maintenir le chantier sec.

Fig. 12a. — Before commissioning. In the background: the temporary cofferdam to prevent flooding of the site during construction.

Fig. 12b. — Après mise en service.

Fig. 12b. — After commissioning.

Fig. 12c. – Détail du seuil vu de l'aval ($40 \text{ m}^3/\text{s}$) faisant apparaître les plots horizontaux en crête de la chute amont, destinés à favoriser la brisure de la lame déversante et les entrées d'air.

Fig. 12c. – Detail of the weir seen from downstream ($40 \text{ m}^3/\text{s}$), showing the horizontal blocks at the top of the upstream chute, designed to help break up the nappe and entrain air.

aussi grande que celle préconisée à la vue des effets sur la maquette.

Il a été noté que pour des contraintes de réalisation, la deuxième chute ne pouvait vraisemblablement pas avoir un degré d'efficacité aussi grand que la première compte tenu de l'impossibilité d'avoir un bassin de réception profond à faible débit, de l'effacement progressif de cette chute à mesure que le débit augmente (chute de plus de 2,5 m à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ mais inférieure à 0,8 m au débit maximal turbinable) et de la faible entrée d'air sous la chute au droit des pieux placés aux angles aval des hexagones.

3.5 Tests d'efficacité des dispositifs de réoxygénation (figure 14)

3.5.1 Le seuil

Le seuil a été achevé fin février 1995. L'usine a d'abord commencé à turbiner $40 \text{ m}^3/\text{s}$ à partir du 3 mars, le complément ($60 \text{ m}^3/\text{s}$) étant apporté par les pertuis de fond.

Par rapport à la situation juste antérieure (lâcher de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ uniquement par les pertuis de fond), cette nouvelle configuration d'écoulement n'a pas modifié (figure 7) la teneur en O_2 dissous à Pointe-Combi ($4,7 \text{ mg/l}$) et pratiquement pas celles d' O_2 dissous ($6,6$ au lieu de $6,8 \text{ mg/l}$ fin fé-

Teneurs en Oxygène et en Méthane à l'Aval immédiat du seuil en fonction de la Hauteur de la Chute

Fig. 13. — Teneurs résiduelles en oxygène et en méthane à l'aval immédiat du seuil oxygénant en fonction de la hauteur de la chute.

Fig. 13. — Residual oxygen and methane contents immediately downstream of the oxygenating weir according to head.

vrier) et de méthane (0,47 mg/l au lieu de 0,45 mg/l le 1^{er} mars) à Kerenroch, station située 7 km en aval du barrage, là où les veines d'eau du canal de sortie de l'usine et du bras court-circuité deviennent mélangées. Comme les concentrations d'O₂ dissous (7,7 mg/l) et de CH₄ dissous à l'aval immédiat du ressaut des évacuateurs de fond (0,45 mg/l) n'ont pas varié avec le passage de 100 à 60 m³/s dans le bras court-circuité, cela signifie que le seuil avait alors un effet d'oxygénation et d'élimination de méthane pratiquement aussi efficace que le ressaut hydraulique en sortie des évacuateurs de fond.

On peut aussi évaluer cette efficacité par l'écart constaté entre les mesures faites à l'aval immédiat (7,4 mg/l de O₂ dissous et 0,8 mg/l de CH₄ dissous) et à l'amont immédiat (1,5 mg/l de O₂ dissous et 5 mg/l de CH₄ dissous) du seuil pendant cette période, ce qui donne un taux d'élimination du méthane de plus de 80%.

Pourquoi ne trouve-t-on pas à l'aval immédiat du seuil la même teneur de CH₄ qu'à l'aval du ressaut hydraulique, résultat auquel on aurait pu s'attendre au vu des très faibles variations observées à Kerenroch avant et après le turbinage? L'explication la plus probable (également

suggérée par des analyses de données sur des périodes ultérieures) est l'hétérogénéité dans la composition physico-chimique transversale et donc la mauvaise représentativité du site de prélèvement d'eau analysée dans le proche aval du seuil.

Le débit turbiné a par la suite été progressivement augmenté au cours des deux mois suivants. L'analyse des données sur les mois de mars et avril 1995 fait apparaître que pour un débit total de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ franchissant le barrage et des teneurs en CH_4 dissous proches de 6 mg/l à l'amont immédiat du seuil et de $0,4 \text{ mg/l}$ en aval du res-saut du bras court-circuité, la concentration de CH_4 dissous à Kerenroch était proche de $0,5 \text{ mg/l}$ pour un débit turbiné de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, de $0,7 \text{ mg/l}$ pour un débit turbiné de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ et entre $0,9$ et 1 mg/l pour un débit turbiné de $100 \text{ m}^3/\text{s}$; la teneur en O_2 dissous en cette station restait alors comprise entre $6,2 \text{ mg/l}$ (pour un turbinage de $100 \text{ m}^3/\text{s}$) et $6,7 \text{ mg/l}$. On a pu constater à cette occasion qu'une augmentation de $0,5 \text{ mg/l}$ de CH_4 dissous à Kerenroch se traduisait par une baisse de $1,5 \text{ mg/l}$ d'oxygène dissous à Pointe-Combi (où le méthane déjà consommé n'est plus présent qu'à l'état de traces), en assez bonne concordance avec le rapport stoechiométrique O_2/CH_4 d'oxydation biologique du méthane (voir annexe).

On note une corrélation entre l'efficacité du seuil, tant du point de vue de sa fonction de réoxygénation que de celle de dégazage du méthane et la hauteur de chute (fig. 13).

Une campagne spécifique a été réalisée le 22 octobre 1996 pour mesurer à deux débits turbinés l'effet de chacune des deux chutes du seuil. On a utilisé un hélicoptère à cette occasion pour faciliter les prélèvements d'eau à l'intérieur des cinq hexagones.

Alors que tout le débit franchissant le barrage était turbiné et que la température de l'eau était de 26°C , on a mesuré que pour un débit de $230 \text{ m}^3/\text{s}$ – débit proche du débit moyen annuel du Sinnamary –, les teneurs en méthane et oxygène dissous qui étaient de 5 mg/l CH_4 et $0,8 \text{ mg/l}$ O_2 à l'amont immédiat du seuil, étaient en moyenne de $2,1 \text{ mg/l}$ CH_4 et $5,2 \text{ mg/l}$ O_2 dans les hexagones avant le passage de la deuxième chute et de $1,3 \text{ mg/l}$ CH_4 et $6,8 \text{ mg/l}$ O_2 dans le proche aval du seuil. Ceci donne un taux d'élimination de méthane dissous par le seuil de 75% .

Pour un débit de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ et des teneurs de $5,5 \text{ mg/l}$ CH_4 et $0,7 \text{ mg/l}$ O_2 en amont du seuil, on a trouvé $2,3 \text{ mg/l}$ CH_4 et $6,1 \text{ mg/l}$ O_2 en moyenne dans les hexagones avant le passage de la deuxième chute, et $1,0 \text{ mg/l}$ CH_4 et $7,1 \text{ mg/l}$ O_2 dans le proche aval du seuil. Ceci donne un taux d'élimination de méthane dissous par le seuil de 80% .

Ces données confirment que l'efficacité d'ensemble du seuil est d'autant meilleure que le débit turbiné est faible. Rappelons que cela peut être dû à une plus grande hauteur de chute, un meilleur entraînement de bulles d'air par unité de volume et/ou

TEST D'EFFICACITE DES DISPOSITIFS DE REOXYGENATION ET DE DEGAZAGE

Fig. 14. – Test d'efficacité des dispositifs de réoxygénation et de dégazage.
Fig. 14. – Test of the effectiveness of the re-oxygenating and degassing systems.

un maintien plus long des bulles d'air dans l'écoulement aval.

Considérons le rapport classique $r = (C_s - C_{am}) / (C_s - C_{av})$ définissant l'efficacité d'oxygénation d'une chute d'eau, avec C_s concentration d' O_2 dissous à l'équilibre avec l'atmosphère soit 8 mg/l à 25 °C et C_{am} et C_{av} les concentrations d' O_2 dissous à l'amont et à l'aval de la chute. D'après les données collectées le 22 octobre, on trouve que r est égal à 2,6 pour la première chute et 2,3 pour la deuxième pour un débit de 230 m³/s. A 80 m³/s, $r = 3,8$ pour la

première chute et 2,1 pour la deuxième.

Si l'on applique également cette approche pour le méthane dissous (avec C_s proche de 0 mg/l), on trouve $r = 2,4$ pour la première chute à 80 m³/s et 230 m³/s; pour la deuxième chute, r est égal à 2,3 à 80 m³/s et 1,6 à 230 m³/s.

Il apparaît ainsi que selon le critère considéré, l'efficacité de la deuxième chute n'est pas du tout négligeable devant celle de la première et que l'efficacité d'ensemble est plus grande pour l'oxygène que pour le méthane.

Fig. 15. – Détail du dispositif Aquatechnique.

Vue des 4 rampes d'injection d'air ancrées sur le fond, à la sortie de l'eau transitant par les turbines.

Fig. 15. – Details of the Aquatechnique system. View of the 4 air injectors anchored at the bottom, at the outlet of the water flowing through the turbines.

3.5.2 Le dispositif additionnel d'insufflation d'air

Il faut remarquer que les résultats présentés au chapitre précédent sont très peu dépendants du niveau de fonctionnement du dispositif d'insufflation d'air par compresseur électrique mis en place par Aquatechnique en tête du canal de sortie de l'usine (fig. 15). On a mis en évidence que ce dispositif pouvait faire passer l'oxygène dissous de 0 mg/l en sortie de turbine à 2 mg/l avant le passage du seuil à lames déversantes et abaisser dans le même temps la concentration de méthane dissous de près de 1 mg/l; mais ces effets sont trop faibles pour affecter sensiblement les teneurs à l'aval du seuil compte tenu de l'efficacité de ce dernier.

Les essais destinés à quantifier le pouvoir de réoxygénation du dispositif Aquatechnique donnent les enseignements suivants pour un débit turbiné de 100 m³/s :

- l'efficacité est proportionnelle à la quantité d'air injecté mais :

- le gain maximal en oxygène est seulement de 2 mg/l avec 3 compresseurs (pour une puissance de 948 kW),

- le dégazage maximal en méthane est de 1,6 mg/l,

- l'oxydation du fer ferreux (Fe++) est presque totale avec 3 compresseurs.

- La valeur ajoutée à l'efficacité du seuil est minime. Au pied du seuil, avec les bulleurs, le gain maximal en oxygène est de 0,5 mg/l, la diminution maximale en méthane est de 0,2 mg/l.

4 L'UTILITÉ DE L'AÉRATION AVAL DANS LE FUTUR

Le seuil a donc un double effet significatif permettant de dépasser 2 mg/l d'O₂ dissous dans le Sinnamary aval :

- il ramène les teneurs en oxygène dissous de l'eau turbinée près de son niveau d'équilibre avec l'atmosphère avec des gains approchant 7 mg/l jusqu'à présent,

- il élimine un puits important d'oxygène dissous par élimination de plus de 75 % du méthane dissous contenu dans l'eau turbinée pour un débit allant jusqu'au débit moyen annuel de la rivière. Compte tenu du fait qu'1 mg/l de méthane dans l'eau lâchée au barrage crée un puits proche de 3 mg/l d'O₂ dissous en moins de 2 jours dans le Sinnamary aval oxygéné, on s'aperçoit que le seuil permettait en mars-avril 1995 et en octobre 1996 d'éliminer une demande en oxygène dissous de près de 12 mg/l.

La question que l'on peut se poser aujourd'hui est le temps pendant lequel ce seuil sera utile pour assurer ce niveau minimal d'oxygène dissous de 2 mg/l dans le Sinnamary aval. La réponse dépend bien sûr de l'évolution future des teneurs en O₂ et CH₄ dissous dans l'eau turbinée, qui sont elles-mêmes directement liées aux concentrations de ces gaz dans le réservoir.

Depuis, la situation la plus critique observée à la fin de la saison sèche de l'année 1994 (décembre 1994 – février 1995), la couche oxygénée de surface atteint régulièrement 5 mètres

dans le réservoir. Cette situation est toutefois encore insuffisante pour que l'eau turbinée soit oxygénée.

Un frein à cette oxygénation de l'hypolimnion du réservoir est la production encore importante de méthane au fond de celui-ci. Ainsi, lors de la campagne de mesures du 22 octobre 1996, la teneur en CH_4 dissous dans l'eau turbinée était aussi élevée que 18 mois auparavant.

Les données de méthane et d'oxygène dissous récemment collectées par le laboratoire d'Aérologie de Toulouse sur des réservoirs de Côte-d'Ivoire mis en eau il y a plus de 15 ans suggèrent que l'abaissement des teneurs de CH_4 dissous au fond du réservoir et indirectement la diminution de CH_4 et l'augmentation d' O_2 dissous dans l'eau turbinée seront un processus lent (Galy-Lacaux 1996). Ceci laisse à penser que les dispositifs d'aération mis en place à l'aval du barrage de Petit-Saut et en premier lieu le seuil à lame déversante seront utiles encore plusieurs années pour garantir en permanence 2 mg/l d'oxygène dissous dans le Sinnamary aval. D'autres facteurs du bilan d'oxygène dissous de la rivière seront cependant à suivre comme la réaération à l'interface eau-atmosphère (qui pourrait augmenter avec une diminution des amas organiques de surface), la photosynthèse et la nitrification (actuellement faibles).

REMERCIEMENTS

Sont remerciés : R. Gras, J.M. Hervouet, L. Barbach, M. Tranchant (EDF-)

DER); M. Truong, M. Bouchie et C. Sisakian (EDF-CNEH) pour leur participation à la conception du seuil aérateur; T. Royer, K. Malatre (EDF-ER) et bien sûr Ph. Cerdan (chef du laboratoire), S. Richard (responsable chimie des eaux), C. Reynouard, V. Horeau et collaborateurs du laboratoire Environnement de Petit-Saut pour leur participation à la conception et à l'analyse des mesures de qualité d'eau réalisées *in situ*, notamment lors des campagnes de vérification de l'efficacité du seuil; T. Alavian et G. Hauser (TVA) pour leur avis donné sur le dessin du seuil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Avery S., Novak P., 1978. Oxygen transfer at hydraulic structures. *J. Hydr. Div.* 104, 1521-1540.
- Dumestre JF., Labroue L., 1996. Réservoir de Petit-Saut. Bilan des respirations aérobies et anaérobies. *CESAC Rapport scientifique n° 2*. Convention GP 7573 EDF-CNEH.
- EPRI 1990. Assessment and guide for meeting dissolved oxygen water quality standards for hydroelectric plant discharges. *EPRI. Report GS/7001/ project 2694-8*.
- Galy-Lacaux C., Delmas R., Jambert C., Kouadio, G., Lacaux JP., 1995. Etude de la méthanogenèse et de son influence sur la consommation d'oxygène dans le réservoir de Petit-Saut. *Univ. Toulouse. Lab-Aérologie Rap. sci. n° 3*. Convention GP 7540 EDF-CNEH.
- Galy-Lacaux C., 1996. Modifications des échanges de substituants mineurs atmosphériques liés à la création d'une retenue hydroélectrique. Thèse. Université de Toulouse.
- Gosse Ph., 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. EDF rapport. EDF/DER/HE31/94/38.

Gosse Ph., Salleron J.L., 1986. Le rôle d'une chute d'eau dans le bilan d'oxygène dissous d'une rivière. *SHF. 19^e journées de l'Hydraulique*. Question 4, rap. 5.

Hanisch H., 1980. Naturmessungen über den sauerstoffeintrag an verschiedenen wehrformen. *Natur und Modellmessungen Zum Kustlichen Sauerstoffeintrag in Flüssen*.

Hauser G., Brock W., 1993. Aerating weir for management of reservoir releases. *North American Lake Management Soc. Symp.*

Hauser G., Proctor W., 1993. Performance of prototype aerating weirs downstream from TVA Hydropower dams. *Proc. Natl. Conf. Hydraul. Eng. San Francisco. ASCE*, p. 99.

Nakasone H., 1987. Study of aeration at weirs and cascades. *J. Env. Eng.* 113, 64-81.

Richard S. et Horeau V., 1996. La mise en eau du barrage de Petit-Saut. Hydrobiologie et hydrochimie. Thèses. Université d'Aix-Marseille.

Rindel A.J., Gulliver J.S., 1990. Oxygen transfer at Spileways *2nd International Symposium on Gas transfer at water surfaces*. Minneapolis, pp. 524-532.

Thron H.D., Hollweg U., Hanisch H., 1979. Untersuchungen über die technischen Möglichkeiten der Gewässerbelüftung. Bundessanstalt für Gewässerkunde. Koblenz n° 10204013.

C (mgO₂/l) dans une rivière non dépourvue de ce gaz s'écrit :

$$\frac{dC}{dt} = K_2 (C_s - C) - K_1 L + P - R - \frac{BEN}{H}$$

(équation 1)

avec :

K ₂ (s ⁻¹)	coefficient d'échange physique à l'interface eau-atmosphère
L (mg O ₂ /l)	matière oxydable dégradable exprimée sous la forme d'une demande en oxygène
K ₁ (s ⁻¹)	vitesse de dégradation de L
P (mgO ₂ /l/s)	production photosynthétique
R (mgO ₂ /l/s)	respiration végétale
BEN (gO ₂ /m ² /s)	demande benthique en oxygène
H (m)	hauteur de la colonne d'eau
C _s (mgO ₂ /l)	concentration d'oxygène dissous à saturation (8 mg/l à 25 °C)

K₂ est souvent déterminé par la méthode de Covar qui sélectionne en fonction de la vitesse et de la profondeur une des 3 formules proposées par Owens, Churchill, O'Connor et Dobbins. L'application de la méthode à 25 °C donne sur le tronçon étudié du Sinnamary une valeur de K₂ dépassant 0,4 jour⁻¹ à 100 m³/s, ce qui apparaît excessif (voir ci-après A.5).

Dans les applications de modèles publiées, K₁ peut prendre des valeurs très différentes, de moins de 0,05 jour⁻¹ jusqu'à plus de 1 jour⁻¹, avec un niveau relativement courant compris entre 0,2 et 0,3 jour⁻¹.

Toute la difficulté est que L peut contenir des matières à dégrader de nature très diverse. Une amélioration classique dans la bibliographie est de différencier au moins deux types de demande, en parti-

ANNEXE

Un modèle simplifié d'oxygène dissous du Sinnamary entre le barrage de Petit-Saut et Pointe-Combi pour les années 1994 et 1995.

A.1 Modélisation classique

Dans les modèles classiques de qualité d'eau généralement unidimensionnels, la variation de la teneur en oxygène dissous

culier les demandes d'origine carbonée et azotée de la matière organique.

Toutefois, aucune application de modèle, à notre connaissance, n'a fait apparaître la nécessité de distinguer explicitement une demande spécifique due à des gaz dissous et plus particulièrement le méthane; il est vrai que l'étude de Petit-Saut est vraisemblablement la première permettant de dégager le rôle de ce gaz – très rarement mesuré en rivière jusqu'ici – sur l'oxygénation d'un cours d'eau placé en aval d'un milieu lacustre durablement désoxygéné. Les spécificités du site sont les suivantes :

- le souci de garantir un niveau d'oxygénation suffisant dans le Sinnamary aval par la délivrance voulue d'un débit réservé oxygéné via les vannes de fond avant mise en route du turbinage;

- conditions de brassage différentes à la sortie du barrage, entre l'eau turbinée et l'eau sortant des vannes de fond;

- conditions hydrauliques (vitesse modérée, profondeur importante) et météorologiques (absence de vent) assurant un maintien prolongé du méthane dans la rivière aval.

A.2 Les trois principaux types de consommation en oxygène d'origine chimique et biologique dans le Sinnamary aval

Considérer un seul type de demande L avec un K_1 donné sur l'ensemble de la période 1994-1995 n'est pas suffisant sur le Sinnamary aval. Il convient de différencier :

- *La consommation chimique rapide (immédiate ou d'au plus quelques heures).*

C'est une demande qui s'exprime dès que l'eau désoxygénée lâchée au barrage est mise en contact avec un milieu oxygéné. Elle démarre ainsi :

- pour les eaux venant de l'évacuateur de fond, dès le passage du ressaut hydraulique ;

- pour les eaux turbinées, dès le passage du dispositif Aquatechnique ou du seuil aérateur, ou avant la mise en place de ces derniers, dès le mélange avec les eaux venant de l'évacuateur de fond.

Cette demande a été évaluée en mesurant expérimentalement la consommation d'oxygène dissous dans un mélange constitué d'une part d'eau de surface du réservoir naturellement oxygénée et d'autre part – en proportion variable – d'eaux prélevées au fond. On a ainsi montré que cette consommation ne dépassait pas 0,5 mg/l à la fin de la saison sèche critique 1994-1995.

Entre dans ce type de consommation, la transformation rapide observée de fer ferreux (jusqu'à 1,5 mg/l à la sortie du barrage) en fer ferrique qui ne génère pas un puit d'oxygène dissous supérieur à 0,2 mg/l, puisqu'un quart de mole d'oxygène est nécessaire pour transformer une mole de fer.

- *La consommation due au méthane dissous*

Par des expérimentations en laboratoire et par l'étude du profil longitudinal de méthane dans le Sinnamary aval, on a pu montrer que l'essentiel de la dégradation du méthane dissous dans le Sinnamary aval – vraisemblablement par les bactéries méthanotrophes – était achevé en près d'un jour et demi, c'est-à-dire sur au moins la moitié du tronçon barrage – Pointe-Combi pour un débit supérieur à 100 m³/s.

On a mis en évidence un rapport de l'ordre de 3 en période sèche entre la variation de la teneur en oxygène dissous à un point de disparition du méthane (Pointe-Combi) et la variation de la teneur en méthane au point de mélange aval barrage (chapitre 2.2). Le fait de ne pas trou-

ver 4 – selon la réaction chimique d'oxydation du méthane, la dégradation d'une mole de ce gaz demande 2 moles d'oxygène – peut s'expliquer par d'autres facteurs perturbateurs comme les échanges physiques de gaz à l'interface eau-atmosphère et la contribution des apports intermédiaires.

On sait qu'au moment des essais de turbinage de août-septembre 1994, la teneur en méthane était proche de 0,2 mg/l (après le ressaut hydraulique) dans la veine d'eau venant de l'évacuateur de fond et de 3 mg/l dans l'eau turbinée.

Comme on se doute que la teneur en méthane n'a pu que croître dans le réservoir entre mars 1994 (où la teneur était au maximum de 0,3 mg/l au fond) et la fin de l'été 1994 (où elle approchait 8 mg/l), on en déduit que la consommation d'oxygène dissous dans le Sinnamary aval due au méthane a été nettement inférieure à 1 mg/l pendant les 5 premiers mois suivant la mise en eau, période pendant laquelle le débit réservé n'était assuré que par les vannes de fond.

Par contre, cette consommation d'O₂ dans la rivière due au méthane a été importante au cours de l'été 1994, du fait des essais de turbinage et de l'augmentation régulière des teneurs en méthane dans le réservoir au cours de cette période.

La construction du seuil aérateur a permis de limiter cette consommation dans le Sinnamary avec l'usine hydroélectrique en exploitation normale, la teneur en méthane n'ayant dépassé 1,4 mg/l en aval du seuil que dans des conditions très particulières d'ouverture simultanée des vannes de fond.

— La consommation lente non liée au méthane

Le fait que l'on observait en mars 1994 une baisse progressive de 3 à 4 mg/l d'oxygène dissous entre le barrage et Pointe-Combi en période sèche alors que le méthane n'était alors présent qu'à l'état de traces prouve qu'il existait un autre type de demande en oxygène dans l'eau.

Une consommation voisine de 3 mg/l a été retrouvée en 48 heures entre avril et juin 1994 sur de l'eau prélevée à la sortie des vannes de fond (après le ressaut) et mise à incuber dans les flacons maintenus *in situ* en surface (mesure classique dite DBO, avec un protocole ne permettant pas de comptabiliser la demande liée aux gaz dissous contenus dans l'eau). Une évolution relativement régulière a été constatée avec une consommation proche de la moitié sur 24 heures.

Si cette demande dont la nature n'a pas été identifiée¹ n'est due ni aux gaz dissous ni à la nitrification (qui ne s'exerce pas sur le tronçon malgré des teneurs en NH₄ élevées), on sait par contre qu'elle a progressivement baissé au cours du temps. Preuve en est qu'en décembre 1994, on n'observait pas de dégradation sensible pour l'oxygène dissous à Pointe-Combi par rapport à mi-1994, alors que la teneur en méthane en sortie des vannes de fond était (après le ressaut) proche de 1 mg/l contre 0,2 mg/l mi-1994 : il fallait que cette DBO non liée au méthane ait diminué, ce qui a été bien vérifié en début mars 1995, où on a mis en évidence que cette DBO ne dépassait pas 1 mg/l/48 heures en moyenne.

¹ Cette demande est-elle à mettre en relation avec le bactérioplancton très abondant dans le réservoir sur la couche 0-10 mètres et dont la concentration a baissé après 1994 ? (travaux de A. Vaquer).

A.3 La contribution de la demande benthique et des échanges physiques à l'interface eau-atmosphère

Plusieurs observations conduisent à minimiser le rôle de ces deux facteurs dans le bilan d'oxygène dissous du Sinnamary aval :

— avant juin 1994, alors que les essais de turbinage n'ont pas eu lieu, on observe une assez bonne correspondance entre la DBO 48 heures mesurée expérimentalement à la sortie du barrage — expérimentation conduisant à ne mesurer que les consommations internes à la masse d'eau et pas la demande benthique de la rivière ni les échanges physiques de cette dernière avec l'atmosphère — et l'écart effectif des teneurs en O_2 dissous entre le barrage et Pointe-Combi (tronçon parcouru en 2 jours).

— en 1995, une fois le méthane éliminé de la colonne d'eau de la rivière (généralement entre Crique-Vénus et Pointe-Combi), le déficit d'oxygène dissous — même quand il est inférieur à 50 % de la valeur de saturation — ne se comble pas vers l'aval.

Cela signifie que dans le Sinnamary aval, l'apport d'oxygène par échange physique à l'interface eau-atmosphère compense la demande benthique en oxygène. Ces deux processus sont égaux et vraisemblablement nuls puisque ce phénomène est observé quelque soit le niveau du déficit.

L'hypothèse de faible influence de ces processus est appuyée par l'évaluation par l'équipe de R. Delmas, d'une élimination vers l'atmosphère d'au plus 20 % du méthane contenu dans la rivière, alors que la teneur en méthane dans l'eau est plus de 100 fois supérieure à la valeur d'équilibre avec l'atmosphère.

Ce qui implique que les échanges physiques d'oxygène à l'interface eau-atmosphère (et donc K_2) sont très faibles pour l'oxygène dissous dont le rapport à la valeur d'équilibre avec l'atmosphère est pratiquement toujours inférieur à 4.

A.4 La contribution des apports intermédiaires

En période sèche, le Sinnamary aval est essentiellement alimenté par le barrage, et les évolutions d'oxygène dissous dans la rivière en particulier à Pointe-Combi s'expliquent bien uniquement à partir de la quantité et de la qualité d'eau lâchée au barrage.

En période de pluies, les apports intermédiaires peuvent jouer un rôle de dilution important, en réduisant l'impact des demandes en oxygène biologiques et chimiques de l'eau franchissant le barrage.

A.5 Quelques équations schématiques type en période sèche

Si l'on se place en période sèche et au-delà des premiers hectomètres sur lesquels s'expriment la demande chimique immédiate, il est ainsi possible de proposer la modélisation simplifiée suivante de l'évolution longitudinale de l'oxygène dissous du Sinnamary aval jusqu'à Pointe-Combi pour un débit supérieur ou égal à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (c'est-à-dire pour un temps de séjour des masses d'eau d'au plus 2 jours entre le barrage et Pointe-Combi) :

$$\frac{dCH_4}{dt} = K'_2 (CH_{4s} - CH_4) - K_C \cdot CH_4$$

(équation 2)

$$\frac{dC}{dt} = K_2 (C_s - C) - K_1 L - f \cdot K_C \cdot CH_4 - \frac{BEN}{H}$$

(équation 3)

avec

K_1L (mg $O_2/l/s$)	Consommation liée à la dégradation de la matière oxydable non liée au méthane.
CH_4 (mg/l)	Teneur en méthane.
CH_{4s} (mg/l)	Teneur en méthane à saturation.
K_C (s^{-1})	Vitesse de dégradation du méthane dans la masse d'eau.
f	Coefficient stoechiométrique = 4 mg O_2 /mg CH_4
H	Profondeur de la rivière proche de 3 mètres.

On note que l'on considère $P = R = 0$, les enregistrements en continu d'oxygène dissous ne mettant pas en évidence de cycle diurne significatif dû à l'activité végétale (les travaux de A. Vaquer confirment qu'il n'y a pas de développement algal planctonique sur ce secteur).

1. Comme CH_{4s} est proche de 0, on peut pratiquement écrire $\frac{dCH_4}{dt} = -(K'_2 +$

$K_C) CH_4$

soit $CH_4(t) = CH_{4barrage} \cdot e^{-(K'_2+K_C)t}$ avec t (en jour) voisin de 66 $Q^{-0.75}$ si on souhaite évaluer CH_4 à Pointe-Combi, Q (m^3/s) étant le débit franchissant le barrage.

2. Comme le méthane restant dans le Sinnamary aval est pratiquement consommé en une trentaine d'heures, et qu'on évalue à près d'un cinquième la fuite de méthane vers l'atmosphère le long de la rivière, K_C et K'_2 seraient respectivement de l'ordre de 1 jour^{-1} et $0,2 \text{ jour}^{-1}$.
3. K_1L était de l'ordre de $1,5 \text{ mg/l/24 heures}$ en mars-avril 1994 et s'est abaissé progressivement au cours du temps en ne dépassant pas $0,5 \text{ mg/l/24 heures}$ à partir du premier trimestre 1995.
4. En mars 1994, alors que le Sinnamary ne contenait pas de méthane, la

teneur en O_2 dissous passait de 7 mg/l à la sortie du barrage à 4 mg/l à Pointe-Combi au bout de deux jours de temps de transit alors que K_1L était proche de 3 mg/l en 48 heures. L'application de l'équation 3 donne $K_2 = 0$ pour une demande benthique négligeable.

Si l'on prend $K_2 = 0,2 \text{ jour}^{-1}$ comme pour le méthane, il est nécessaire pour obtenir 4 mg/l d'oxygène dissous à Pointe-Combi par l'équation 3, de considérer un puits d'oxygène dissous supplémentaire qui pourrait être la demande benthique BEN, prise égale à $1,5 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ sur le Sinnamary aval.

5. Une valeur de K_2 de $0,5 \text{ jour}^{-1}$ suggérée par la méthode de Covar – qui suppose une demande benthique proche de $4 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ en mars 94 – apparaît trop élevée pour être cohérente avec les observations de l'équipe du professeur Delmas sur les échanges de méthane à l'interface eau-atmosphère, et avec l'assez bonne correspondance stoechimétrique constatée entre variation des teneurs en méthane à la sortie du barrage et variation des teneurs en O_2 dissous à Pointe-Combi (rapport de 3).

En effet, si l'on se place dans la situation postérieure à la construction du seuil aérateur dans le canal de l'usine (K_1L inférieure à $0,5 \text{ mg/l/jour}$ et teneur en méthane de l'ordre de 1 mg/l en sortie de barrage), l'application des équations 2 et 3 avec $K_2 = 0,5 \text{ jour}^{-1}$ donne une variation d'oxygène dissous inférieure à 1 mg/l à Pointe-Combi (alors qu'elle est de $1,5 \text{ mg/l}$ d'après les observations) pour une variation de méthane dissous de $0,5 \text{ mg/l}$ dans l'eau de sortie de barrage. Par ailleurs, une telle valeur de K_2 ne permet pas d'expliquer que la teneur en oxygène dissous – même pour un niveau bas de 3 mg/l – n'augmente pas en 1995 entre Crique-Vénus et Pointe-Combi, une fois que le méthane a disparu de l'eau.