



HAL
open science

Barrages et développement durable en France

Patrick Le Delliou, Paul Royet, Jacques Lavabre, Catherine Fouchier

► **To cite this version:**

Patrick Le Delliou, Paul Royet, Jacques Lavabre, Catherine Fouchier. Barrages et développement durable en France. Cemagref Editions, 317p., 2003, 2-85362-624-5. hal-04189457

HAL Id: hal-04189457

<https://hal.inrae.fr/hal-04189457v1>

Submitted on 28 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ACTES DE
COLLOQUE

Paris
18 novembre 2003
CFGB - MEDD
France

PUB 00012082

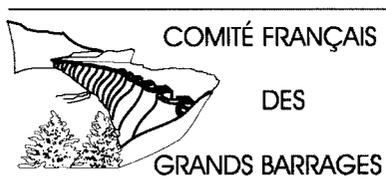
Barrages et développement durable en France

Barrages et Développement Durable en France

Paris
18 novembre 2003

Colloque technique organisé par
le Comité Français des Grands Barrages
et
le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

CEMAGREF
DOCUMENTATION
CLERMONT-FERRAND



Comité d'organisation

Geneviève BAUMONT, ministère de l'Écologie et du Développement Durable, D4E – Patrick BONNET, Comité Français des Grands Barrages – Jean-Pierre CHABAL, Coyne et Bellier – Gérard DEGOUTTE, ENGREF – Jean DUNGLAS, CTPB – Jean-Jacques FRY, EDF-CIH – Alain GREGOIRE, EDF-CIH – Laurence LEJEUNE, IIBRBS – Michel LINO, ISL – Jacques MIQUEL, EDF-MH – Jean Pierre MORIN, Conseil Général des Côtes d'Armor – Marie Pierre NERARD, SCHAPI Direction de l'Eau – Jean-Luc PIGEON, Coyne-et-Bellier (Secrétaire) – Jean-Luc ROY, EP Loire – Paul ROYET, CEMAGREF – Robert SCHOEN, ministère de l'Écologie et du Développement Durable, direction de l'Eau – Bernard TARDIEU, Coyne-et-Bellier

Comité scientifique

Pierre BALLAND, ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Gérard DEGOUTTE, ENGREF – Alain GREGOIRE, EDF-CIH – Noël GODARD, ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Patrick LE DELLIOU, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie – Bernard MAHIOU, EDF – Jean Luc PIGEON, Coyne et Bellier – Mme Sandrine RICHARD, Hydreco – Paul ROYET, Cemagref – Alain VERRY, EDF.

Comité Français des Grands Barrages
Savoie Technolac

73373 Le Bourget du lac

Tel : 33.4.79.60.60.84 / Fax : 33.4.79.60.62.98

<http://www.barrages-cfgb.org>

E-mail : cfgbarrages@yahoo.fr

Actes du colloque technique « **Barrages et Développement Durable en France** », organisé par le Comité Français des Grands Barrages et le ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Paris, 18 novembre 2003. Secrétariat d'édition : Christine de Labouchere – CFGB. Suivi de l'édition : Maurice Merlin (Cemagref). Imprimé et façonné par Jouve, Paris. Dépôt légal : 4^e trimestre 2003 – Cemagref Éditions, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél : 01 40 96 62 85. ISBN 2-85362-624-5 – Prix : 33,50 euros ttc.

Sommaire

Session 1 : Barrages et risques

L'analyse des risques appliquée aux barrages	7
Patrick LE DELLIOU : BETCGB	
Comportement hydrologique des barrages lors de la crue de septembre 2002 sur le Vidourle. Enseignements à en tirer	15
Paul ROYET, Jacques LAVABRE et Catherine FOUCHIER : Cemagref	
Plans Particuliers d'Intervention « barrages ». Synthèse des études de danger à EDF : Michel POUPART et Gilbert CASTANIER : EDF	29
La prévention des risques à l'aval des barrage	41
Jean-Yves DELACOUX : EDF, Pierre VALIRON et Drac 95 : FNVAC	
La régularisation du bassin de la Seine	53
Jean Louis RIZZOLI : IIBRBS	
Ralentissement dynamique des crues, le cas du bassin de l'Oudon	65
Arnaud DE BONVILLER et Michel LINO : ISL	
Présentation de solutions, par petits barrages en terre, pour la prévention des risques d'inondations sur des bassins semi-urbains	77
Alain CASSARD : DDAF 67 ; Jean B. POULET , Abdelali TERFOUS, Pierre REGENASS, Abdelah GHENAÏM : INSA Strasbourg,	

Session 2 : Bilan socio-économique et culturel de l'implantation des ouvrages

Ressource hydraulique et diversification des usages.	89
Le cas de la haute vallée de l'Arc	
Alain MARNEZY : Université de Savoie et Maire d'Aussois	
Le Barrage du Salagou dans l'Hérault, vocation originelle et usages actuels	99
Bernard DARTAU et Jean-Louis BROUILLET : département de l'Hérault	
Bilan économique et social des usages sur la retenue de Vouglans	111
Marie Christine DALLOZ : Conseil Général 39 ; M. Luidgi MEI et M. Jean-Luc PIGEON : Coyne et Bellier	
Le barrage de Serre Ponçon. Retour d'expérience socio - économique de sa construction et évolution de son exploitation multi-usages	123
Bernard MAHIOU, Martine GIUGE et Dominique ROUX : EDF ; Pierre BALLAND : Inspection Générale de l'Environnement	
Ouvrages à vocation mixte (soutien des étiages et irrigation) dans le sud-ouest de la France. Évolution des usages et modalités de financement	143
Daniel BOUBÉE : CFGB/CACG, Henri TARDIEU : CFGB/CACG	

Session 3 : Les impacts sur les milieux physiques et biologiques

- La vidange du barrage de Kerne Uhel sur le Blavet : impact sur le milieu** 151
Alain JIGOREL, INSA de Rennes et Jean Pierre MORIN Conseil Général des Côtes d'Armor
- Impacts sédimentologique et biologique de la gestion des sédiments dans le bassin maritime de la Rance** 163
Alain JIGOREL : INSA de Rennes ; François LANG, Dominique MELEC : Association Cœur ; Maurice LEDRAPPIER : EDF
- Dragages d'entretien du Rhône et Environnement** 179
Eric DOUTRIAUX et Luc LEVASSEUR : Compagnie Nationale du Rhône
- L'expérience d'Électricité de France dans la gestion du transport solide au droit des retenues – Céline BABBIERO, Jean Pierre BOUCHARD et Alain POIREL : EDF ; Alice PEREIRA : Agence Eau Adour-Garonne** 191
- Analyse des impacts sur le milieu aquatique de retenues de soutien des étiages dans le Sud-Ouest de la France** 213
Daniel BOUBÉE : CFGB / CACG ; Antoine HÉTIER : CACG
- Impact des discontinuités sur la dynamique des peuplements de macrophytes en grands cours d'eau. Application à l'hydrosystème Adour-Garonne** 229
Émilie BREUGNOT, Alain DUTARTRE, Christophe LAPLACE-TREYTURE : Cemagref ; Jacques HAURY : UMR INRA-ENSA Rennes
- Le partenariat E.D.F - U.N.P.F. Actions et travaux en faveur du milieu** 251
Gérard GUILLAUD : UNPF

Session 4 : Domaines de recherche : barrages et évolution du climat

- Examen de la stationnarité des écoulements du Rhône en lien avec la variabilité climatique et les actions humaines** 261
Eric SAUQUET : Cemagref ; Muriel HAOND : Compagnie Nationale du Rhône
- Les émissions de gaz à effet de serre par le réservoir de Petit Saut en Guyane** 271
Alain GRÉGOIRE : EDF ; Sandrine RICHARD : Hydreco
- Réservoirs et émissions de gaz à effet de serre.** 283
Conséquences pour l'hydroélectricité
Jean-Luc PIGEON : Coyne et Bellier
- Le changement climatique affectera-t-il nos hydrosystèmes ?** 293
Le cas des bassins du Rhône et de la Seine
Jean-Michel TANGUY et Maurice MÜLLER : ministère de l'Écologie et du Développement Durable,
- Évolution à long terme des régimes hydrologiques** 303
Étienne FROSSARD et Henri GARROS-BERTHET : Coyne et Bellier

Session 1

Barrages et risques



L'analyse des risques appliquée aux barrages

Risk assessment for dams

Patrick Le Delliou

B E T C G B

44, avenue Marcelin Berthelot - 38030 Grenoble Cedex

Tél. 04 76 69 34 70

Fax. 04 38 49 91 99

E. mail : patrick.ledelliou@industrie.gouv.fr

Résumé

L'histoire, parfois récente, montre que le risque nul en matière de barrages n'existe pas plus là que dans bien d'autres domaines. L'analyse structurée des risques fait appel à des concepts et des méthodologies en cours de développement et dont l'objectif est de cerner, au mieux, les causes fondamentales de risque et de rendre plus efficace la maintenance et la réparation des ouvrages.

La gestion du risque implique, au-delà du dimensionnement des ouvrages et de leurs dispositifs de sécurité, une organisation de la surveillance, des contrôles et des plans particuliers d'intervention pour les grands barrages.

Abstract

The history, sometimes recent, shows that the risk is never non-existent neither in the field of dams nor in other domains.

This analysis of risks appeals to concepts and emerging methodologies in order to better determine the real causes of the risks and to proceed to a more efficient maintenance and repair. Risk management imposes a good conception of the dams and their security devices, an organization of the surveillance, controls and emergency preparedness plans for important dams.

Mots clés : Risque, Aléa, Probabilité, Conséquences, Rupture, Gestion, Plan d'urgence.

Keywords : Risk, Hazard, Probability, Consequences, Failure, Management, Emergency plan.

INTRODUCTION

Le risque nul n'existe pas. Ce principe est d'une évidence criante dans la vie courante qu'il s'agisse de traverser la rue, prendre sa voiture... Des accidents majeurs comme celui de la centrale de Tchernobyl ou celui, plus récent, de l'usine AZF de Toulouse, sont là pour rappeler que le risque intéresse aussi les installations à caractère industriel et technologique. La spécificité de ce type de risque réside d'abord dans l'ampleur collective voire sociale des conséquences, mais aussi par la perception du risque souvent considéré comme imposé à l'individu.

Les barrages font totalement partie de ces installations spécifiques et l'histoire n'est pas sans rappeler l'existence du risque associé.

Evaluer, de façon la plus objective, possible le risque et l'intégrer dans des processus de décision et de gestion constitue, dans la communauté internationale des barrages, un enjeu fort en terme de recherches, de développements méthodologiques avec des débuts de mise en application.

1. DES ACCIDENTS DE BARRAGES

Plusieurs ouvrages importants ont, par le passé, connus des accidents majeurs, des ruptures provoquant l'écoulement à l'aval de la totalité du volume d'eau de la retenue avec des conséquences souvent dramatiques dans la vallée. L'histoire des barrages français a gardé la trace de plusieurs événements de ce type. On peut citer la rupture du barrage-poids en maçonnerie de Bouzey en 1898, ou, plus récemment, celle du barrage-voûte de Malpasset situé au-dessus de l'agglomération du Fréjus. L'onde de rupture du barrage de Malpasset a provoqué des dégâts considérables avec 421 morts et d'énormes pertes économiques.

On trouve dans d'autres pays d'autres catastrophes parfois plus dramatiques encore. Dans certains cas, les dégâts se mesurent surtout en terme d'atteinte à l'environnement comme, par exemple, lors de la rupture du barrage de stériles de Aznalcóllar survenue en Espagne en avril 1998 .

Ces incidents extrêmes ne doivent pas faire oublier les ruptures beaucoup plus nombreuses d'ouvrages plus modestes, heureusement sans conséquences importantes.

On peut tirer trois renseignements importants des statistiques de rupture de barrages établies par la Commission Internationale des Grands Barrages :

- un très grand nombre de ruptures se produisent au cours de la première mise en eau de la retenue ou très peu de temps après celle-ci ;
- entre un quart et un tiers des ruptures se produisent à l'occasion d'une crue, soit qu'il s'agisse d'une crue très supérieure aux capacités d'évacuation de

l'ouvrage, soit (mais ce n'est pas exclusif) du fait d'un dysfonctionnement de l'évacuateur ;

- les ruptures d'ouvrages récents sont moins nombreuses que par le passé, très vraisemblablement du fait des progrès accomplis dans les domaines de la conception, la construction et la surveillance des barrages.

Le risque associé aux barrages, c'est aussi celui qui peut se produire en exploitation, notamment au cours des variations rapides de débit dans les rivières et dont l'accident survenu sur le Drac à l'aval du barrage de Notre Dame de Commiers en 1995 constitue un exemple dramatique.

2. ANALYSE DES RISQUES

Au-delà de l'intérêt général d'une meilleure appréciation des risques, les méthodes d'analyse en cours de développement représentent des enjeux forts pour les maîtres d'ouvrages :

- répondre aux exigences de transparence et d'information de la société qui attend des ingénieurs, des techniciens plus que l'assurance péremptoire de l'absence totale de risque ;
- donner des outils de gestion du patrimoine en mettant en exergue les opérations les plus rentables pour réduire les risques, notamment pour gérer un parc d'ouvrages ;
- apprécier l'augmentation du risque en fonction du vieillissement des ouvrages et bâtir des politiques de maintenance préventive.

Les approches traditionnelles du risque, telles qu'elles sont encore largement pratiquées et notamment en France pour la gestion des grands barrages, sont essentiellement déterministes. Elles ne permettent pas d'appréhender la sécurité d'ensemble des structures et ne fournissent pas d'indication directe pour l'élaboration de politique de maintenance et d'entretien d'un parc de barrages.

Les méthodes globales d'analyse probabiliste des risques sont, fondamentalement, assez proches des études de fiabilité en vogue dans l'industrie.

2.1 Définition

Proposer une définition objective de la notion de risque au-delà de sa signification dans le langage courant n'est pas simple. Le sens habituel est largement perturbé et dépendant de la perception du risque qu'ont les individus (voire sa négation). Le concept de risque est, à peu près, stabilisé au niveau international dès lors qu'on aborde les méthodes et techniques dites d'analyse des risques qui seront évoquées au paragraphe suivant. Le risque est lié à l'occurrence d'un événement indésirable : pour un barrage, il s'agira de la rupture totale ou partielle du barrage

avec une quantité significative d'eau relâchée à l'aval. Ce peut être également une non-maîtrise des débits à l'aval.

Le risque est aussi lié aux conséquences de l'événement. Celles-ci sont évidemment multiples. Elles se décrivent d'abord en terme de vies humaines dans la zone submergée après la rupture du barrage ou de l'accident. On peut naturellement citer bien d'autres composantes de la notion de conséquences : économie, environnement... En particulier le risque économique est important pour les maîtres d'ouvrage, par exemple en terme d'assurance.

Le risque global apparaît ainsi comme un ensemble de triplets comportant un scénario conduisant à un événement indésirable, la probabilité associée à ce scénario, ses conséquences.

On adopte généralement une présentation simplifiée où le risque associé à un scénario est égal à la probabilité d'un événement multipliée par les conséquences de cet événement en se limitant, la plupart du temps, aux conséquences en terme de vies humaines. La combinatoire sur l'ensemble des scénarios définit le risque global associé à un ouvrage.

Peu de personnes se lancent dans une approche macro-économique globale socialement difficilement acceptable passant par une valorisation monétaire de la vie humaine.

2.2 Analyse des risques

Les méthodes et outils en cours de développement et/ou qui connaissent un début d'utilisation au niveau mondial relèvent, peu ou prou, de la démarche suivante, même s'il existe bien d'autres approches possibles :

- a) Identification des aléas. Il peut s'agir d'aléas externes tels que les crues, les séismes ou d'aléas internes tels que le vieillissement des matériaux ou des organes électromécaniques.
- b) Construction des scénarios de rupture. A cet effet, on construit par exemple des arbres de défaillance de façon à combiner des aléas individuels (une crue centennale + une alimentation électrique défaillante + un allongement des délais d'arrivée de l'exploitant sur le site + ...).
- c) Probabilisation des différents scénarios aboutissant à une rupture (figure 1).
- d) Détermination des conséquences associées à chaque mode de rupture. L'analyse détaillée prend en compte la vitesse de dégradation et la possibilité de déclencher une alerte préalable.
- e) Calcul du risque global.

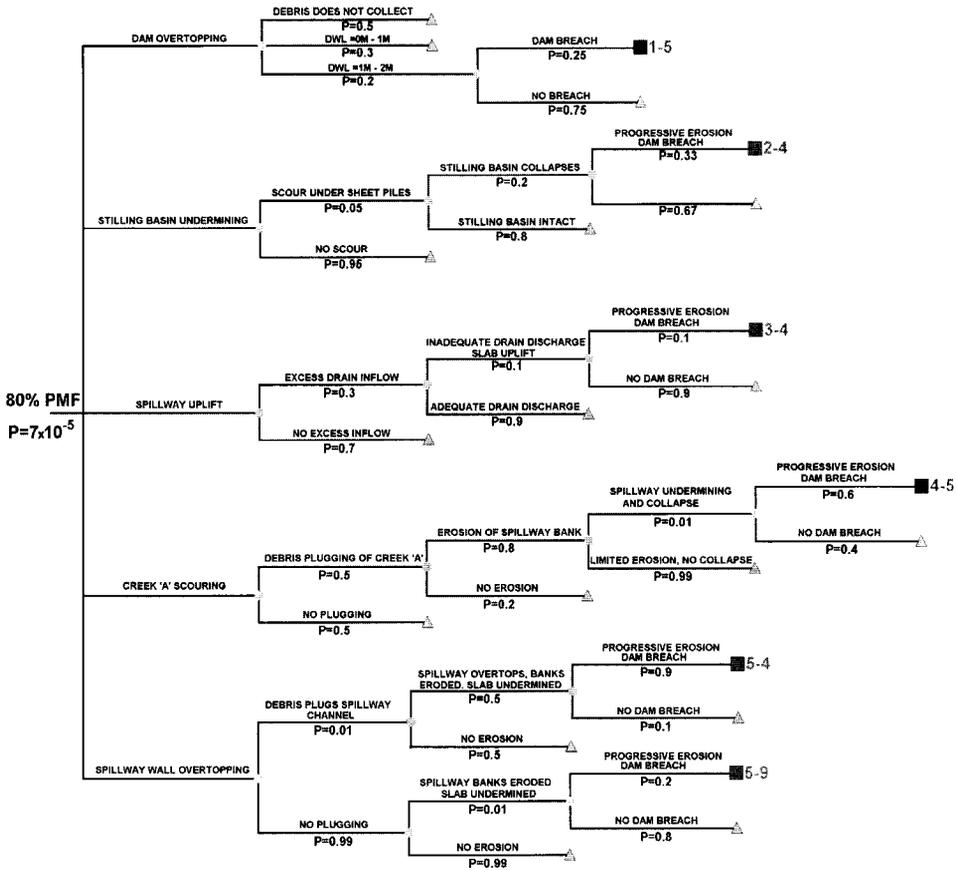


Figure 1 - Arbre de défaillance

Cette première partie de la démarche permet donc une estimation du risque. L'étude la plus délicate consiste à associer à chaque niveau d'aléa une probabilité. Certains aléas sont "assez facilement" probabilisables ; c'est le cas, par exemple, des crues fréquemment exprimées en période de retour. D'autres échappent encore assez souvent à l'analyse statistique (probabilité d'apparition d'un renard dans une digue en terre - probabilité d'occurrence d'une erreur humaine...).

Il s'agit d'une difficulté importante qui explique l'utilisation encore modeste de ces techniques pour calculer, dans l'absolu, un risque global.

Le calcul des conséquences probables de la rupture présente aussi des difficultés considérables. On sait calculer, avec une précision raisonnablement suffisante, l'onde de submersion qui résulterait d'une rupture d'un barrage et donc la population concernée (au moins statistiquement). Faute de données statistiques (fort heureusement), on a beaucoup de mal à calculer un taux de décès.

On peut noter que, dans certaines études où le risque principal résulte d'une crue extrême, on ne retient que la différence entre le nombre de victimes à la suite de la rupture et celui que causerait l'inondation naturelle.

L'analyse des risques présente, malgré des difficultés pratiques, des intérêts évidents pour :

- mettre en évidence les scénarios de rupture les plus probables (qui ne sont pas toujours associés aux événements extérieurs, notamment les crues, les plus rares) ;
- identifier les points faibles d'un barrage pour mieux cibler un renforcement, une auscultation ;
- établir des priorités d'action pour un parc de barrages relevant du même maître d'ouvrage.

2.3 Niveau acceptable de risque

La suite de la démarche théorique consiste à comparer le risque à un niveau de risque jugé acceptable.

Le choix d'un niveau de risque humain supportable relève clairement du monde politique et non d'une décision de l'ingénieur.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus international pour définir le niveau de risque qu'on peut accepter. Plusieurs critères ont été proposés par divers pays. Ils intègrent, la plupart du temps, un critère de risque individuel (la probabilité, pour un individu dans la zone de submersion, de périr suite à un accident lié au barrage) et un risque dit sociétal qui se présente souvent sous la forme d'une courbe reliant le risque (produit de la probabilité par les conséquences) au nombre de victimes. La figure 2 indique les critères envisagés par la compagnie BC Hydro au Canada.

On note en particulier, lorsque les conséquences potentielles sont importantes (plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de morts), que les probabilités d'accidents doivent être extraordinairement petites, ce qui renforce d'autant la difficulté de chiffrer, avec une "précision" suffisante, la probabilité correspondante.

Le risque économique acceptable est clairement lié aux capacités financières du maître d'ouvrage et/ou de son système d'assurance.

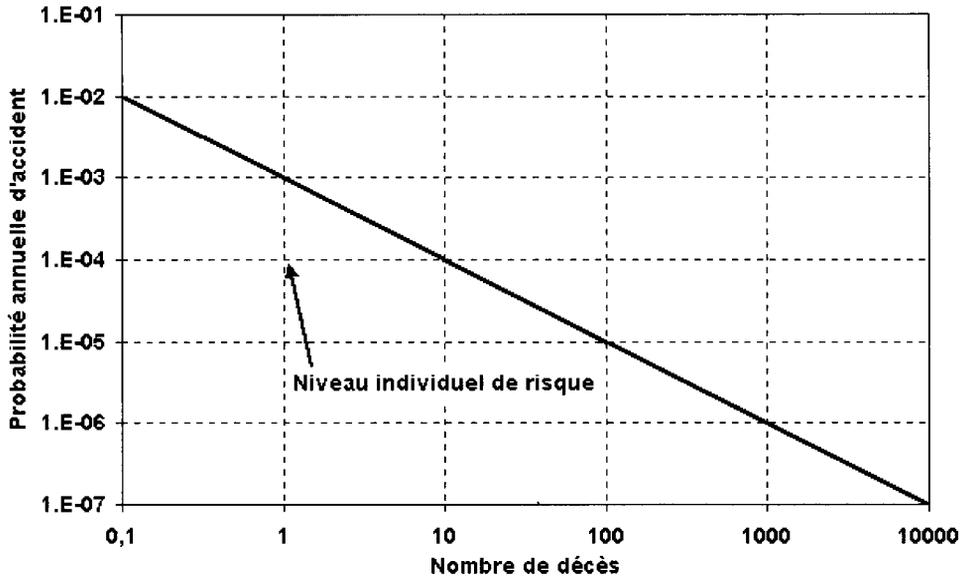


Figure 2 - Critère d'acceptabilité du risque (proposition BC Hydro)

3. ANALYSE RELATIVE DES RISQUES

L'approche globale esquissée ci-dessus, bien que très satisfaisante en théorie, se heurte à des difficultés importantes d'application pratique. L'analyse préalable du système, son découpage en sous-système, en fonction, l'identification des aléas et des modes de défaillance sont des étapes loin d'être triviales. Mais la principale difficulté, parfois rédhibitoire réside dans la détermination, ne serait-ce qu'à dire d'expert, des probabilités (aussi bien sur les probabilités d'accident que sur les conséquences).

Une approche relative, comparative permet de mettre en facteur commun et donc d'éliminer un certain nombre de difficultés. L'analyse peut alors permettre de choisir entre plusieurs stratégies de maintenance pour un barrage, ou de classer les ouvrages faisant partie d'un parc donné pour déterminer un ordre d'intervention. Il peut encore s'agir de limiter l'analyse à un sous-système ; c'est par exemple le cas pour les évacuateurs de crues dont la partie mécanique peut bénéficier d'une approche de type industrielle du risque.

On peut également noter que les méthodes de cotation par index obtenu après une analyse multicritères permettant de classer des barrages, ou des sections d'aménagement relèvent de la même philosophie.

4. GESTION GLOBALE DES RISQUES

L'analyse des risques est un des outils de management du risque global dont les leviers restent :

- la conception des ouvrages, qu'il s'agisse de la conception initiale ou de celle qui sera obtenue après renforcement et habilitation. Le mode d'opération et d'exploitation du barrage et de la retenue font, à ce stade, intégralement partie de la conception ;
- la surveillance qui est un moyen extrêmement puissant de détecter avec un recul suffisant des évolutions, des dérives qui, si aucune mesure corrective ou conservatoire n'est entreprise, pourraient s'avérer dangereuses en terme de risque. Dans l'organisation française, la surveillance de l'ouvrage au sens large (inspections visuelles, auscultation, maintenance) est de la responsabilité du maître de l'ouvrage, sous le contrôle de l'administration de tutelle (de façon opérationnelle : DDAF, DDE ou DRIRE) ;
- la préparation aux événements extrêmes par l'intermédiaire des plans de secours et notamment pour les très grands barrages, c'est-à-dire ceux dont la hauteur est supérieure à 20 m et dont le volume de retenue dépasse 15 hm³ d'eau, par les plans particuliers d'intervention. Ces plans, établis à partir des cartes d'inondation représentant la zone qui serait submergée par la rupture d'un barrage ainsi que les temps d'arrivée de l'onde, définissent les rôles et responsabilités de chacun des acteurs (exploitant, préfecture, mairie, protection civile...) en matière d'alerte, d'évacuation des populations, d'organisation des secours. L'exemple de la rupture du barrage de Teton aux Etats Unis démontre l'intérêt d'une alerte préventive suffisante. Une information efficace et à jour de la population est également considérée comme essentielle.

5. CONCLUSION

Nier l'existence d'un risque lié aux barrages serait une absurdité plusieurs fois démontrée par l'histoire. En fixer le niveau acceptable, au regard des autres activités humaines, nécessite une démarche complexe qui relève à la fois du social et du politique. Les méthodes d'analyse des risques en plein développement au niveau international (cf. parution d'un prochain bulletin CIGB) et en France en permettent une approche plus objective et plus structurée et constituent des outils de gestion du risque résiduel que d'autres mesures visent à rendre aussi faible que possible.

Comportement hydrologique des barrages lors de la crue de septembre 2002 sur le Vidourle

Enseignements à en tirer

Hydrological behaviour of dams during September 2002 flood on Vidourle River.

Lessons to be learned

Paul ROYET, Jacques LAVABRE, Catherine FOUCHIER

Cemagref, UR "Ouvrages hydrauliques"
Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix en Provence Cedex
Tel. 04 42 66 99 42
Fax 04 42 66 88 65
E.mail : paul.royet@cemagref.fr

Résumé

L'événement hydrologique exceptionnel de septembre 2002 a affecté particulièrement les trois barrages écrêteurs de crues sur le haut bassin du Vidourle. A partir des nombreuses données disponibles, il a été possible de reconstituer les crues entrantes dans les retenues. Le traitement de l'information pluviométrique permet de situer la période de retour de l'événement. L'analyse des études hydrologiques antérieures amène à remettre en cause certains de leurs fondements. Cela nous conduit à proposer les bases sur lesquelles devraient être menées les études visant à réévaluer la sécurité de ces ouvrages.

Abstract

A major hydro-climatic event occurred in Southern France in September 2002, affecting specifically three flood mitigation dams located on the Vidourle River upper basin. The numerous data available for this event enabled to calculate the hydrogram at the entrance of the reservoirs and to give an estimation of the efficiency of the mitigation role of the dam on the downstream floods. These elements were combined with an evaluation of the occurrence of the rain on the catchment area of each of the dams. An analysis of the previous dam hydrological studies brought us to criticise some of their hypothesis. That leads us to propose the basis for the safety revaluation of those dams.

Mots-clés : crues, barrages écrêteurs, événements hydrologiques extrêmes, sécurité des barrages

Keywords : floods, dams for flood mitigation, extreme hydrological events, dam safety

Introduction

La façade sud-est du Massif Central connaît périodiquement des crues très violentes, situées surtout en automne. C'est après avoir connu tels événements en octobre 1958 que le Département du Gard s'est lancé dans la construction de cinq barrages écrêteurs de crues qui ont été édifiés dans les années 1960 et 1970 et dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le Tableau 1.

Nom du barrage	La Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac	Ste Cécile	Sénéchas
Cours d'eau	Crieulon	Rieumassel	Vidourle	Gardon d'A.	Cèze
Surface du BV	94 km ²	44 km ²	83 km ²	109 km ²	113 km ²
Type	Poids	Poids	Mixte	Remblai	Voûte
Hauteur sur t. n.	18 m	15 m	17 m	41 m	58 m
Cote du déversoir	85,00	156,40	125,00	261,20	266,20
Capacité à cette cote	8,3 hm ³	4,7 hm ³	8,65 hm ³	16 hm ³	16,2 hm ³
Cote de la crête	87,00	157,90	126,50	267,5	271,5

Tableau 1 : principales caractéristiques des barrages écrêteurs de crues du Gard

Sur le plan hydraulique, et à quelques variantes près, tous ces barrages fonctionnent sur le même principe :

- deux pertuis libres traversent le barrage à sa base ; un batardeau protège ces pertuis contre l'obstruction par les flottants et crée, le cas échéant, une petite retenue permanente en fond de cuvette ; les barrages sont donc transparents pour les petites crues ;
- pour les crues moyennes, la mise en charge des pertuis provoque le remplissage de la retenue, tout en limitant fortement le débit rejeté en aval ;
- pour les crues extrêmes, et une fois la retenue pleine, un seuil de surface de grande longueur permet le déversement du débit entrant excédentaire.

1. L'événement de septembre 2002 sur les barrages

Les 8 et 9 septembre 2002, de très fortes précipitations ont affecté l'ensemble du département du Gard et une partie des départements limitrophes. Des cumuls de plus de 600 mm de pluie en 24 heures consécutives ont été observés. Ces pluies ont entraîné des crues exceptionnelles sur les trois rivières Cèze, Gard et Vidourle.

Les cinq barrages écrêteurs de crues du département du Gard ont, quant à eux, connu des crues très variables, faibles pour certains, exceptionnelles pour d'autres. Ainsi, les retenues des barrages de Sénéchas et Sainte-Cécile-d'Andorge, situés respectivement sur les hauts bassins versants de la Cèze et du Gardon d'Alès, n'ont pas atteint, et de loin, la cote de leur déversoir de surface :

- à Sénéchas, la cote maximum de la retenue s'est située 26,2 m en dessous du déversoir de surface, alors qu'en aval, la Cèze a connu une crue historique ;
- à Sainte-Cécile-d'Andorge, la cote maximum de la retenue s'est située à 15,45 m en dessous du déversoir de surface, alors qu'en aval, dès Alès, le Gardon d'Alès puis le Gard ont connu eux aussi une crue historique.

Les trois barrages écrêteurs situés sur le haut bassin du Vidourle ont, quant à eux, connu leurs plus hauts niveaux depuis leur mise en service et ont tous trois déversé sur leur seuil de surface, avec, pour le barrage de la Rouvière, un déversement sur le couronnement (*Tableau 2*).

	La Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac
Cote maximum atteinte le 09/09/02	87,75	156,71	125,45
Lame sur le seuil (m)	2,75	0,31	0,45
Lame sur la crête (m)	0,75		

Tableau 2 : cotes NGF sur les barrages du Vidourle lors de l'événement

C'est donc sur le haut Vidourle et sur ces trois barrages que porte l'analyse contenue dans la présente communication. Nous étudions tout d'abord l'événement sur le plan pluviométrique en cherchant à lui attribuer une période de retour, puis sur le plan hydraulique en reconstituant les crues arrivées dans les barrages. Les études hydrologiques antérieures sont ensuite confrontées à ces résultats. En conclusion, on propose quelques leçons à en tirer pour leur révision.

2. L'événement pluviométrique de septembre 2002

2.1. Analyse des données disponibles

Les précipitations ont commencé le 8 septembre autour de 9 h TU et ont duré environ 24 h sur la partie amont du bassin versant du Vidourle. A l'échelle du département du Gard, l'événement s'est prolongé du fait du déplacement de la cellule pluvieuse.

La station radar de Nîmes, située à quelques dizaines de km au sud-est de la zone touchée par l'événement, fournit des données de pluie radar dont deux calibrations différentes sont disponibles. La calibration HYDRAM utilise un facteur de correction constant sur l'événement, calculé, en temps normal, sur les données des mois précédents. Pour cet événement, Météo-France a revu le coefficient de calibration a posteriori en s'appuyant sur les cumuls de pluie recueillis dans les pluviomètres. Nous disposons des lames d'eau ainsi calculées au pas temps horaire, avec une résolution spatiale de 1 km². La *Figure 1* montre l'extension spatiale de l'événement à partir de l'outil HYDRAM, présentée sur une durée de 48 heures de façon à bien visualiser l'extension spatiale de la totalité du phénomène.

Une deuxième calibration radar, dénommée CALAMAR, est également disponible. La correction est effectuée à pas de temps fin, à partir des données télétransmises d'un réseau de pluviographes. Les lames d'eau fournies par CALAMAR sont disponibles au pas de temps de 5 mn, intégrées à l'échelle des bassins versants. La comparaison directe des outils HYDRAM et CALAMAR est donc difficile.

Le troisième type d'information pluviométrique disponible est l'ensemble des relevés journaliers d'un réseau de 75 pluviomètres situés dans les départements

du Gard et de l'Hérault. Une interpolation spatiale par une fonction spline des cumuls de pluie des 8 et 9 septembre permet d'estimer les lames précipitées sur la totalité de l'événement, sur les bassins versants.

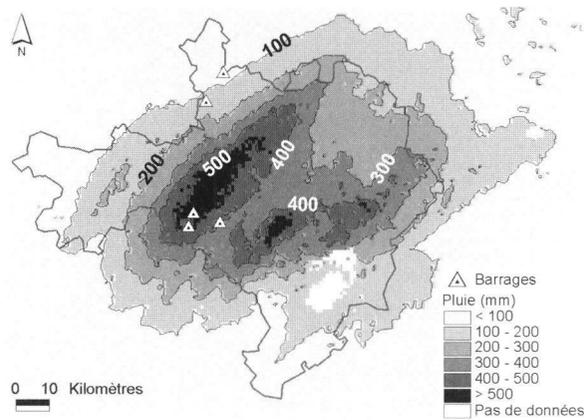


Figure 1 : extension spatiale de l'événement de Septembre 2002 sur le département du Gard. Calibration HYDRAM de la pluie en 48 h à partir du 8 septembre, 00h00 TU.

Au final, l'étude des lames précipitées sur la durée totale de l'événement révèle l'incertitude qui entoure cette information (Tableau 3). Les écarts entre les méthodes utilisées peuvent être importants (25% entre les estimations HYDRAM et CALAMAR du cumul en 24 heures sur le bassin versant de Conqueyrac). Les écarts sur les intensités horaires sont encore plus importants, avec des rapports de l'ordre de 1 à 2, voire 3 entre les trois sources de données.

Bassin	Superficie	Lames précipitées (mm)		
		Réseau sol	HYDRAM	CALAMAR
Sommières	627 km ²	396	411	440
Conqueyrac	83 km ²	374	413	318
Ceyrac	44 km ²	371	436	382
La Rouvière	94 km ²	572	492	576

Tableau 3 : estimations des lames précipitées sur les bassins versants du haut Vidourle. Pluies radar calculées entre 06h00 TU le 08/09/2002 et 17h00 TU le 09/09/2002. Données sol issues d'une interpolation.

L'incertitude sur la connaissance des pluies sur les bassins versants reste donc élevée malgré la bonne couverture radar de l'événement. Ceci traduit les problèmes auxquels se heurte encore le traitement de l'imagerie radar.

2.2. Évaluation de l'occurrence de la pluie

Nous avons cherché à caractériser l'importance de l'événement par l'estimation de sa période de retour. La pluie maximale a été étudiée à deux échelles spatiales :

- ponctuellement, à l'aide de mailles de 1 km² couvrant en continu la zone étudiée ;
- globalement, au niveau des bassins versants.

2.2.1 Le modèle SHYREG

Le Cemagref a développé un modèle de simulation de scénarios de crues, dénommé SHYPRE (Simulation d'HYdrogrammes pour la PREdétermination des crues). Il consiste en un modèle stochastique de génération de pluies horaires associé à un modèle simple de transformation pluie-débit (Arnaud et Lavabre, 2002). Les distributions de fréquence des variables hydrologiques sont obtenues à partir de la simulation d'un grand nombre d'événements. L'exploitation des données de 50 stations pluviographiques établies sur le pourtour méditerranéen a permis de dégager des tendances régionales basées sur la pluie journalière. Une version spatialisée de SHYPRE, dénommée SHYREG (Lavabre J., Fouchier C. et Gregoris Y., 2003) et développée avant l'événement de septembre 2002, fournit, pour les trois régions bordant la Méditerranée, des cartes d'intensités-durées-fréquences (IDF) de pluies à la résolution du km² (Fouchier et Lavabre, 2002).

2.2.2 Estimation de l'occurrence des pluies ponctuelles

Dans un premier temps, nous avons confronté les estimations HYDRAM des totaux en 24 heures aux cartes IDF de SHYREG. La Figure 2 montre les estimations des périodes de retour locales ainsi obtenues sur le haut Vidourle.

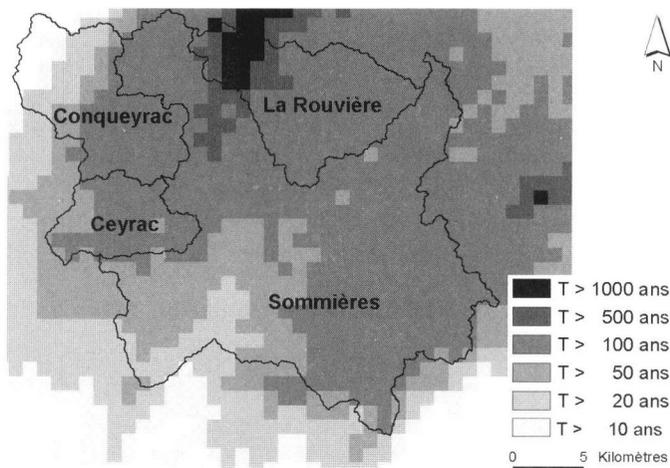


Figure 2 : estimation locale de la période de retour de la pluie radar HYDRAM en 24 heures, à partir de 9h00 TU le 08/09/2003

On constate une forte hétérogénéité spatiale de l'événement avec des périodes de retour ponctuelles de moins de 10 ans sur le nord-est du bassin de Conqueyrac à plus de 1000 ans sur le nord-est du bassin de La Rouvière situé à moins de 15 km.

2.2.3 Estimation de l'occurrence à l'échelle du bassin

L'estimation de l'occurrence des pluies de bassin est plus délicate, car elle demande la connaissance de l'abattement statistique permettant de passer des

quantiles de pluies ponctuels aux quantiles de la pluie de bassin. Nous utilisons les coefficients d'abattement statistique proposés récemment par Neppel et al (2003). Nous les appliquons aux quantiles moyens fournis par la méthode SHYREG pour les périodes de retour de 100, 500 et 1000 ans. Nous obtenons ainsi, pour ces périodes de retour, les quantiles de la pluie de bassin auxquels nous pouvons confronter les estimations radar intégrées sur chaque bassin versant (Figure 3).

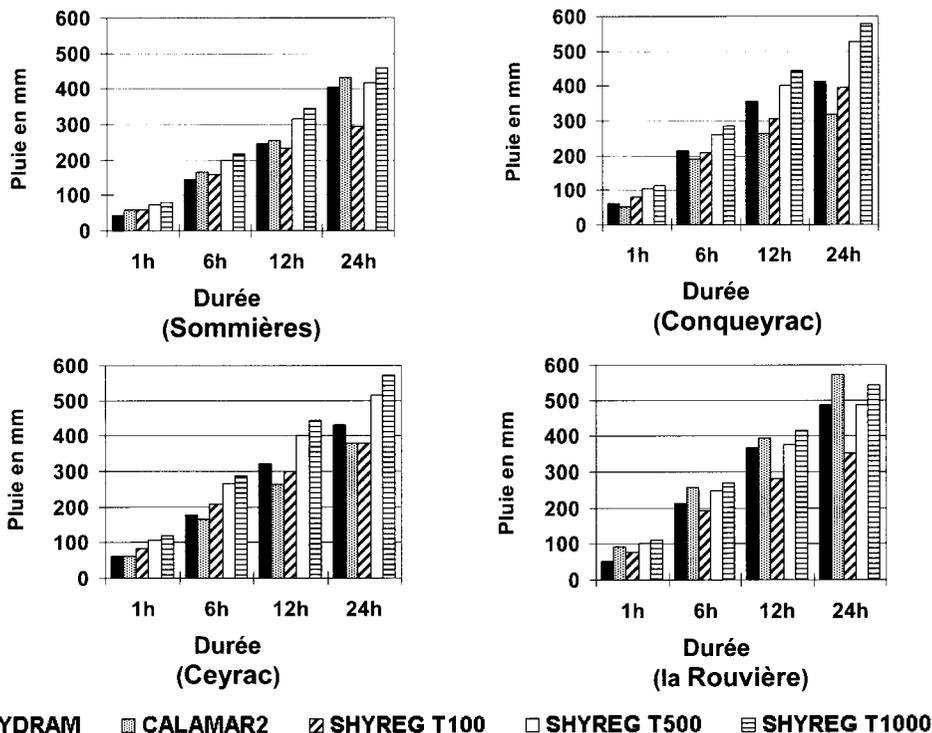


Figure 3 : confrontation des pluies radar moyennes de bassin maximales sur 1, 6, 12 et 24 h avec les quantiles de même durée pour les périodes de retour 100, 500 et 1000 ans

L'estimation de l'occurrence d'un événement pluviométrique est donc un exercice qui se révèle difficile. Outre les incertitudes liées à la connaissance de la pluie de l'événement et aux pluies de référence, la période de retour de l'événement varie avec les durées de pluie étudiées. C'est pour les durées de 12 et 24 heures que l'événement des 8 et 9 septembre 2002 apparaît particulièrement exceptionnel.

3. Reconstitution des crues aux barrages

3.1 Méthodologie

Pour chacun des trois barrages du bassin du Vidourle, la démarche a été la suivante (avec quelques adaptations dues aux données disponibles) :

- *Vérification des lois cote - débits des différents organes d'évacuation des crues.* Les données d'archives étant parfois discordantes, nous nous sommes basés essentiellement sur les données issues des études les plus récentes (Coyne & Bellier, 1985), que nous avons parfois critiquées et ajustées. Pour le barrage de Ceyrac, nous avons également essayé de prendre en compte les pertes dans les réseaux karstiques communiquant avec la retenue ;

- *Reprise des lois cote - volume des retenues à partir des archives.* Une incertitude subsiste sur la façon dont ont été obtenues ces données : agrandissement des fonds topographiques au 1/25 000^{ème} ou relevés topographiques des cuvettes ? Une autre incertitude provient de la non planéité des retenues au plus fort de la crue. Après vérification des données de laisses de crues, il s'avère que la retenue de Conqueyrac était globalement plane ($\Delta = 7$ cm entre amont et aval), tandis que la retenue de la Rouvière présentait une pente plus marquée ($\Delta = 50$ cm entre amont et aval), dont il n'a cependant pas été tenu compte dans les calculs ;

- *Modélisation grâce à un programme Excel* mis au point par B. Dartau au titre du Syndicat mixte du Vidourle. Pour chaque pas de temps de 5 mn (pas de temps des enregistrements de la cote de la retenue), le débit entrant est déduit du débit sortant en lui ajoutant le stockage dans la retenue dû à la montée du plan d'eau pendant le pas de temps précédent. On calcule ensuite un débit lissé sur une dizaine de pas de temps encadrant l'instant de la mesure ;

- *Vérification de la cohérence des résultats*, en particulier sur le cumul des volumes entrants et sortants.

3.2 La modélisation au barrage de la Rouvière

Le barrage de la Rouvière est doté de deux pertuis de fond ouverts, protégés par un batardeau. L'évacuateur de surface est constitué d'un seuil libre profilé, en 19 passes de 4 m, séparées par des piliers qui supportent une passerelle en béton, susceptible de provoquer la mise en charge du seuil. Le fonctionnement simulé a pris en compte ces éléments :

- le débit évacué est, dans un premier temps, contrôlé par le batardeau (loi de seuil), jusqu'à mise en charge des pertuis ;
- à partir de ce moment, c'est la loi d'orifice des pertuis qui contrôle le débit ;
- lorsque la cote dans la retenue dépasse la cote du seuil de surface, au débit des pertuis s'ajoute le débit sur ce seuil ;
- lorsque le niveau de l'eau atteint la passerelle, le débit dans les passes du seuil est alors calculé avec une formule d'écoulement en charge ;
- au delà de la cote de la crête, le déversement se produit sur la longueur du couronnement, réduite pour tenir compte des embâcles sur la crête.

La Figure 4 présente les résultats de la simulation. La crue entrante présente deux pointes successives à environ 1 400 m³/s. La première pointe de crue survient très tôt le 9 septembre ; elle provoque une montée très rapide de la retenue et une mise en service du seuil de surface, avec une première pointe du débit évacué à

plus de 500 m³/s. Le débit entrant chute ensuite à moins de 200 m³/s avec une légère baisse de la retenue et du débit relâché, mais sans que cesse le déversement sur le seuil. Ce premier corps de crue apporte déjà 23 hm³.

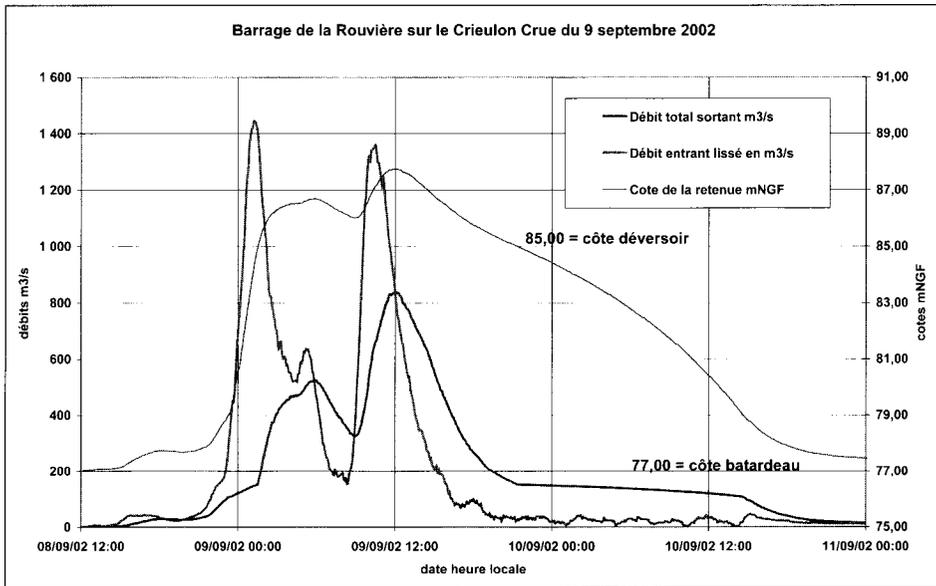


Figure 4 : hydrogrammes au barrage de la Rouvière.

La deuxième pointe de crue arrive alors en fin de matinée sur une retenue plus que pleine. Elle provoque la surverse sur la crête pendant plus de 4 heures avec une cote maximale de 87,75 atteinte à midi ; le débit évacué maximum est évalué à 840 m³/s se répartissant en 165 m³/s à travers les pertuis, 555 m³/s sur le seuil de surface et 115 m³/s au dessus du couronnement. Ce deuxième corps de crue apporte à nouveau plus de 20 hm³. Rappelons, à titre de comparaison, les capacités de stockage de la retenue :

- 7,7 hm³ entre les cotes 77,00 (batardeau amont) et 85,00 (seuil de surface) ;
- 5,5 hm³ supplémentaires entre les cotes 85,00 et 87,00 (crête).

La crue entrant dans le barrage a donc connu **deux pointes successives aux alentours de 1 400 m³/s**. La lame écoulee en 24 h est de 447 mm. L'incertitude sur la valeur des débits maxima entrants est essentiellement liée à l'incertitude sur la courbe cote - volume de la retenue, tandis que l'incertitude sur la lame écoulee est liée à l'incertitude sur les coefficients de débit des pertuis et seuils.

3.3. Les modélisations aux barrages de Ceyrac et Conqueyrac

Au barrage de Ceyrac, comme à la Rouvière, la crue entrante présente deux corps successifs. Les volumes sont pratiquement égaux (5 à 6 hm³ pour chacun), mais la deuxième pointe a été beaucoup plus forte en débit. La première pointe de crue, à 300 m³/s, n'a pas provoqué de surverse sur le seuil de surface et a donc

été très bien laminée. La deuxième pointe est arrivée peu de temps après, sur une retenue qui n'était que peu redescendue. Son débit maximum est évalué à plus de **500 m³/s**. Elle a provoqué la mise en service du déversoir de surface. Le débit aval maximal a été de l'ordre de **180 m³/s** se répartissant à parts égales entre pertuis et seuil de surface. La lame entrant dans la retenue est de **250 mm** en 24 h.

Au barrage de Conqueyrac, la crue entrante présente, là aussi, deux corps successifs, de volumes identiques d'environ 10 hm³ chacun. Le premier corps culmine avec une pointe à plus de **550 m³/s**. Il n'a pas provoqué le remplissage complet de la retenue et a donc été très fortement laminé avec un débit sortant de 80 m³/s. Une décrue temporaire s'est ensuite produite, mais avec un débit entrant qui est resté supérieur au débit sortant et la retenue a continué à se remplir. De ce fait, l'arrivée du deuxième corps de crue avec un débit dépassant 320 m³/s a provoqué la mise en service de l'évacuateur de surface et a entraîné un débit aval maximal de **230 m³/s**. La lame d'eau écoulee au barrage est de **220 mm** en 24 h.

3.4. Impact des retenues sur la crue

Les volumes écoulés ont excédé les capacités de stockage des retenues. Ceci est particulièrement frappant pour la retenue de la Rouvière pour laquelle le volume écoulé est de l'ordre de 3 fois le volume correspondant aux PHE. L'impact des retenues sur les débits de pointe est variable. Si la première pointe de crue a été partout bien écrêtée, le coefficient d'écrêtement de la deuxième pointe varie de 64% pour Ceyrac à 38% pour la Rouvière et seulement 28% pour Conqueyrac.

4. Confrontation aux crues de projet des barrages

4.1 Études d'origine

Les études hydrologiques d'origine des barrages du département du Gard ont été réalisées en 1959, juste après les crues dévastatrices du 30 septembre et du 4 octobre 1958. Les études spécifiques à chaque barrage ont ensuite été menées dans les années 1960.

La méthode statistique est utilisée pour l'étude des pluies et la méthode de l'hydrogramme unitaire pour la détermination des débits ruisselés, avec une "perte d'averse" qui s'accroît avec l'intensité de la précipitation. Pour le bassin du Vidourle, les seules données pluviométriques de longue durée disponibles à l'époque ne concernaient que trois stations. A partir de ces données, ont été établies des lois exponentielles liant intensité, durée et fréquence (IDF). Sur leurs durées respectives (9 et 5 h), la pluie du 30/09/58 se voit attribuer une période de retour de 10 ans et celle du 4/10/58 une période de retour de plus de 200 ans.

Les barrages sont dimensionnés pour permettre l'évacuation de la crue millénale (arrivant sur une retenue vide) sans débordement sur le seuil de surface. Il était

ensuite pris l'hypothèse d'une crue pentamillénale arrivant sur une retenue déjà pleine ; une telle crue devait être évacuée sans débordement sur le couronnement.

	La Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac
Débit de pointe	1 535 m ³ /s	1 072 m ³ /s	1 440 m ³ /s
Volume de crue	9,5 hm ³	6,2 hm ³	9,94 hm ³
Lame ruisselée	101 mm	140 mm	120 mm

Tableau 4 : caractéristiques des crues pentamillénales des études d'origine

Avec les séries de données plus complètes dont nous disposons aujourd'hui et au vu de l'état actuel des connaissances en hydrologie, on peut formuler les critiques suivantes sur ces études :

1. En comparant les hiétoigrammes des pluies extrêmes (T = 1000 ans) obtenus avec l'outil SHYREG et celui adopté dans les études d'origine, l'intensité horaire maximale de la pluie ponctuelle est, dans tous les cas, de l'ordre de 150 mm. Par contre, les études anciennes sous-estimaient fortement les cumuls sur des durées plus longues. Ainsi, le cumul ponctuel sur 24 h est de 320 à 340 mm dans les études anciennes alors qu'il est de 600 mm, voire plus, avec SHYREG

2. La modélisation pluie - débit des études anciennes considérait une infiltration horaire (appelée plutôt "perte d'averse"), qui était soit constante, soit croissante avec l'intensité de la pluie. Il n'y avait donc pas de limite à l'infiltration sur la durée de l'événement. De plus, les crues considérées étaient très courtes, de l'ordre de 8 h. Les lames ruisselées sont donc faibles (100 à 150 mm pour la crue de projet).

On peut aujourd'hui conclure que les études d'origine fournissaient un bon ordre de grandeur des débits de pointe. Par contre, les volumes de crues étaient fortement sous-évalués.

4.2 Révision des crues de projet au début des années 1980

Une étude très complète de l'hydrologie du département du Gard (crues et étiages) a été réalisée au début des années 1980. Un premier volet porte sur une étude régionale des pluies. Les données exploitées ont été nombreuses, mais sur des séries pluviographiques courtes (1963 - 1979), complétées par quelques séries pluviométriques sur 60 à 70 ans. L'étude permet de déterminer des courbes IDF saisonnalisées. Les paramètres sont régionalisés et l'extrapolation vers les fréquences rares est faite par des lois exponentielles. Une relation linéaire est établie entre la valeur du gradex des pluies et la pluie moyenne journalière. Les paramètres sont définis par bassin versant et sur chacune des trois saisons. Des relations sont établies pour passer des pluies ponctuelles aux pluies de bassin, le coefficient d'abattement de la pluie dépendant de la surface et de la forme du bassin versant (Tableau 5).

Barrage	la Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac
Pluie annuelle de durée 24h	105 mm	114 mm	118 mm
Gradex des pluies de durée 24h	43 mm	48 mm	50 mm
Pluie ponctuelle en 24h, de période de retour 1 000 ans	402 mm	445 mm	463 mm
Pluie de bassin en 24 h, de période de retour 1 000 ans	382 mm	423 mm	440 mm

Tableau 5 : valeurs des pluies journalières sur les bassins versants des barrages, données par l'étude régionale de 1985.

Par rapport aux précédentes études des années 1960, les quantiles de pluie rares ont donc été réévalués à la hausse : la pluie ponctuelle en 24 h de période de retour 1 000 ans, précédemment estimée à **320 à 340 mm** selon les barrages, a été **réévaluée à 400 à 460 mm**. Mais on reste encore assez largement en dessous des estimations des études les plus récentes (**600 à 640 mm** avec SHYREG).

L'étude des débits est basée sur les données d'une vingtaine de stations limnigraphiques, exploitables sur des séries de 10 à 16 ans, aucune donnée n'étant disponible pour les crues de 1958, où toutes les stations existantes à l'époque avaient été emportées. L'étude, faite au pas de temps journalier, est basée sur l'hypothèse d'une loi exponentielle pour les écoulements, avec une valeur du gradex des ruissellements calculée à partir d'une relation non linéaire en fonction de la pluie journalière annuelle. Il s'en suit que le gradex des ruissellements est inférieur au gradex des pluies. Il ne s'agit donc pas d'une application conventionnelle de la méthode du Gradex telle que proposée par EDF et qui considère qu'au delà d'une certaine période de retour, tout le supplément de pluie se transforme en ruissellement (le gradex des écoulements est alors égal au gradex des pluies).

Une forme d'hydrogramme synthétique est proposée, valable pour les crues de toutes périodes de retour. Cet hydrogramme est très long, avec un temps de montée de 20 h et un temps de descente de 40 h. Le débit de pointe se déduit du débit moyen maximal sur 24 h par un rapport de 2,3. On aboutit ainsi aux caractéristiques résumées dans le Tableau 6.

Barrage	la Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac
Ruissellement journalier annuel	25,6 mm	28,7 mm	30,1 mm
Gradex des écoulements (24 h)	21,6 mm	24,5 mm	25,8 mm
Ruissellement journalier de période de retour 1 000 ans	174,6 mm	197,8 mm	208,1 mm
Débit pointe entrant T = 1 000 ans	437,5 m³/s	232 m³/s	460 m³/s
Débit pointe entrant T = 5 000 ans	542,5 m³/s	278 m³/s	552 m³/s

Tableau 6 : valeurs des lames ruisselées en 24 h et des débits de pointe sur les bassins versants des barrages, données par l'étude régionale de 1985.

A la lumière de nos connaissances actuelles, on peut formuler les critiques suivantes sur ces études :

1. Bien que réévaluées à la hausse par rapport aux estimations de 1960, les quantiles de pluie journalière restent inférieurs aux estimations des études les plus récentes, l'écart étant de l'ordre de 30%.
2. La modélisation des lames ruisselées utilise une loi exponentielle, mais il ne s'agit pas de l'application conventionnelle de la méthode du Gradex. On aboutit ainsi à des valeurs de déficit d'écoulement qui sont très élevées et suivent elles aussi une loi exponentielle en fonction de la période de retour de l'événement. Cette absence de limite au déficit d'écoulement est discutable et conduit à des volumes ruisselés qui restent faibles. Sur la base des études de 1985, les crues observées en septembre 2002 se verraient attribuer une période de retour d'un peu plus de 1 000 ans à Conqueyrac, de 10 000 ans à Ceyrac et une valeur encore plus considérable à la Rouvière. Ceci n'est évidemment pas cohérent avec les indications fournies plus haut et rappelées ci-après sur les pluies.
3. Il est proposé une forme unique d'hydrogramme, qui apparaît exagérément étalé (60 heures au total), en contradiction avec un certain nombre d'observations. Cela conduit à des débits de pointe très faibles pour les crues de projets, débits qui ont été très largement dépassés en septembre 2002 sur deux des trois barrages, et aussi en octobre 2001 au barrage de la Rouvière.

5. Période de retour de l'événement

Le *Tableau 7* rappelle les périodes de retour estimées par la méthode SHYREG pour les pluies de bassin. Au vu des incertitudes qui entachent les estimations radar de la pluie, on peut considérer que les périodes de retour données pour les pluies HYDRAM et CALAMAR sont du même ordre de grandeur, excepté pour le bassin de la Rouvière où les pluies HYDRAM sont probablement sous-estimées.

Bassin	Période de retour	
	Pluie HYDRAM	Pluie CALAMAR
Sommières	440 ans	660 ans
Conqueyrac	120 ans	40 ans
Ceyrac	190 ans	100 ans
La Rouvière	500 ans	1500 ans

Tableau 7 : périodes de retour des pluies en 24 heures de bassin.

Il apparaît intéressant de mettre en parallèle ces occurrences de pluie avec les occurrences des crues résultantes. Le débit de pointe de crue à Sommières a été estimé à 2 550 m³/s (BRL, 2003). Il aurait été de 3 140 m³/s en l'absence des barrages. La période de retour attribuée à cette crue "naturelle", suite à un

ajustement statistique¹, varie entre 200 ans et 380 ans selon la loi de probabilité adoptée pour l'ajustement. La période de retour de la crue des 8 et 9 septembre 2002 serait donc légèrement plus faible que celle des précipitations qui l'ont générée, tout en restant du même ordre de grandeur.

On ne dispose pas encore d'estimations précises des périodes de retour des crues du Vidourle à Conqueyrac, du Rieumassel à Ceyrac et du Crioulon à la Rouvière mais on constate le dépassement des crues de projet des barrages. Pour Ceyrac et Conqueyrac, ce dépassement s'est produit pour une occurrence de pluie relativement modeste, inférieure à 200 ans. Il y a donc lieu de reconsidérer les crues de projet de ces ouvrages. Cette conclusion s'impose encore plus pour le barrage de la Rouvière, où la cote des plus hautes eaux a été dépassée.

Conclusion

Même si l'événement de septembre 2002 a eu des conséquences dramatiques en terme de pertes en vies humaines et de dommages économiques, il reste dans la lignée d'événements semblables déjà enregistrés sur la façade méditerranéenne. Le haut bassin du Vidourle, et plus particulièrement le bassin du Crioulon, figurent parmi les zones les plus touchées par la pluie, avec localement des cumuls en 24 h auxquels nous attribuons une période de retour de 1 000 ans. A l'échelle du bassin versant du barrage de la Rouvière, nous attribuons une période de retour de 500 à 1 500 ans à la pluie de bassin, selon l'exploitation qui est faite des données radar. Les études régionales récentes réalisées sur le pourtour méditerranéen doivent désormais servir de bases pour l'évaluation de l'aléa qui, bien souvent, devra être revu à la hausse par rapport à des études antérieures basées sur des données moins riches.

Lors de l'événement de septembre 2002, les barrages du Vidourle ont réduit de 40 à 65% le débit de pointe de la crue et en ont retardé le passage. Cette efficacité, moindre que celle estimée lors de la construction de ces ouvrages, se réduit vers l'aval pour n'être plus, à Sommières, que d'environ 20% sur le débit de pointe et 0,5 m sur la ligne d'eau (BRL, 2003). Parallèlement, le dépassement constaté des crues de projet sur ces trois barrages met clairement en évidence la nécessité de réviser profondément les études hydrologiques de tous les barrages écrêteurs de crues du département.

L'analyse de leur sécurité devra s'appuyer sur la modélisation de toute la série des crues de périodes de retour rares à extrêmes en s'intéressant plus aux volumes de crues qu'aux débits de pointe. Pour chaque barrage, nous suggérons de bien distinguer trois notions :

- les crues d'aménagement, correspondant à une efficacité optimale du laminage, avec une retenue atteignant tout juste le seuil de surface ;

¹ L'ajustement statistique a été effectué selon la méthode du renouvellement sur une chronique de 43 crues majeures répertoriées à Sommières depuis 1890. Les crues récentes, à l'exception de 6 d'entre elles, ont été reconstituées dans des conditions naturelles, ie hors influence des barrages, grâce à une modélisation hydraulique.

- les crues de projet, associées à une période de retour de 1 000 ans pour les barrages en béton et 10 000 ans pour les barrages en remblai selon la pratique actuelle du CTPB ;
- la crue de sûreté, conduisant à atteindre un niveau d'eau au delà duquel on estime que l'intégrité du barrage ne peut plus être garantie (notion de cote de danger des PPI) ; ce niveau devra être déterminé pour chaque barrage en fonction de ses caractéristiques géomécaniques et de la résistance à l'érosion en aval.

Enfin, au vu du déroulement des faits en septembre 2002, nous recommandons très fortement de maintenir un fonctionnement des pertuis ouverts totalement et en permanence pendant toute la durée de la saison automne - hiver.

Références

Arnaud P. et Lavabre J. (2002). Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research*, 38 (6), 1075, 11 p.

BRL (2003). Crue des 8 et 9 septembre 2002 sur le Vidourle. BRL ingénierie, 47 p.

Fouchier C. et Lavabre J. (2002). Synthèse des débits de crue sur les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon. Phase II : régionalisation du modèle pluie-débit. Convention n° 57/2000. MATE, Météo France, CETE Méditerranée, Cemagref, 79 p.

Lavabre J., Fouchier C. et Gregoris Y. (2003). SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises. Ingénierie EAT, à paraître, SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises.

Lavabre J., Fouchier C., Royet P. et Felix H. (2003). Analyse de l'événement des 8 et 9 septembre 2002 sur les barrages du Vidourle.

Lavabre J., Gregoris Y. et Dartau B. (2002). L'événement des 8 et 9 septembre 2002 sur le département du Gard. Quelques informations hydrologiques. 24 p.

Neppel L., Bouvier C. et Lavabre J. (2003). Abattement spatial des précipitations en Languedoc-Roussillon. *Hydrology of mediterranean and semi-arid regions*, Montpellier, April 2003. International association of hydrological sciences.

Plans Particuliers d'Intervention « barrages » Synthèse des études de danger à EDF

Dams emergency plans

Synthesis of danger studies at Electricité de France.

Michel Poupart

EDF Branche Energies – Mission Hydraulique
1 place Pleyel, 93282 St Denis CEDEX
Tel. 01 43 69 36 81
Fax 01 43 69 30 77
E.mail : michel.poupart@edf.fr

Gilbert Castanier

EDF TEGG Division Géologie Géotechnique
905 Av Camp de Menthe, 13100 Aix en Provence
Tel. 04 42 95 95 77
Fax 04 42 95 95 00
E.mail : gilbert.castanier@edf.fr

Résumé

Les études de danger réalisées sur les 68 barrages EDF soumis à la réglementation PPI permettent de faire des synthèses pour les risques crue, séisme et glissement de terrain. Ce dernier point est particulièrement approfondi dans cet article qui présente une classification des différents types de glissements recensés lors des études des sites de retenues ainsi que leurs caractéristiques en terme de risque potentiel. Les aspects crues et séismes sont plus brièvement traités.

Abstract

The danger studies carried out on the 68 Electricité de France' dams concerned with the emergency plans regulation (PPI) make it possible to draw synthesis on the flood, earthquake and landslide risks. This last point is particularly developed in this paper which presents a classification of different types of slides found during the survey on the reservoir sites, along with their characteristics about potential risk. The aspects dealing with flood and earthquake are more briefly described.

Mots-clés : Plan d'intervention, barrage, étude de danger, glissement de terrain

Keywords : *Emergency plan, dam, danger study, landslide*

1. Les études de danger pour les PPI « barrages »

La loi du 22/07/1987, relative à *l'organisation des secours en cas de catastrophe*, prévoit l'établissement de plans d'urgence par les pouvoirs publics. Les décrets d'application des 6/05/1988, 15/09/1992 et l'arrêté du 22/02/2002 définissent les dispositions applicables aux barrages en vue de l'établissement des "**Plans Particuliers d'Intervention**" (PPI).

Pour permettre aux préfets d'établir ces PPI, les Maîtres d'Ouvrage doivent fournir (Le Delliou P. ; 2000) :

- une analyse des risques que les crues, les séismes ou les effondrements de terrain dans la retenue peuvent engendrer pour les barrages,
- un projet d'installation des dispositifs techniques de détection et de surveillance, et d'alerte aux autorités et aux populations,
- une estimation des conséquences de la rupture de l'ouvrage (onde de submersion).

Une centaine de barrages sont concernés en France (hauteur supérieure à 20 m et capacité de la retenue supérieure à 15 hm³), parmi lesquels 68 sont exploités par EDF.

En fait, bien avant la loi du 22/07/1987, à la suite de la rupture du barrage de Malpasset en 1959 et du glissement de terrain catastrophique de Vajont en Italie en 1963, l'Administration française a créé, en 1966, le Comité Technique Permanent des Barrages (CTPB), devant lequel les maîtres d'ouvrage, dont EDF, sont tenus de présenter un dossier avant toute construction d'un barrage important (H >20 m). Ces dossiers comportent nécessairement des études géologiques et hydrologiques, dans lesquelles les risques cités ci dessus ont été traités pour les barrages construits après 1966.

Les études de danger engagées dans le cadre des dispositions nouvelles sur les PPI ont été l'occasion de reprendre ces études pour tous les barrages en adoptant une méthodologie garantissant l'homogénéité des résultats. Les choix effectués et les principaux résultats obtenus sont décrits ci dessous succinctement pour les études des risques crues et séismes, et de manière plus détaillée pour les glissements de terrain.

2. Le risque crue

Les déversoirs de crue sont dimensionnés pour évacuer des crues extrêmes de durée de retour 1 000 ans ou 10 000 ans, suivant que le barrage est du type béton ou remblai. On ne peut cependant pas écarter le cas de crues supérieures à ces crues de projet ou des dysfonctionnements des matériels conduisant à une perte de capacité d'évacuation. Dans ces cas, et dans l'objectif de prévenir les pouvoirs publics, on définit une cote dite de danger, au delà de laquelle on estime que

l'exploitant perd le contrôle du barrage. Cette cote est en général fixée à 1 m au dessus de la crête des barrages en béton, et au sommet de l'organe d'étanchéité pour les barrages en terre. A cette cote de danger correspond un débit maximal de crue, que l'on peut alors comparer à la crue de projet, ce qui donne, pour l'ensemble du parc, une estimation de la sensibilité des barrages au risque crue (Bister D., Le Delliou P., 2000). A titre d'exemple, ce ratio, toujours supérieur à un, est présenté pour les barrages béton à évacuateurs vannés (fig. 1).

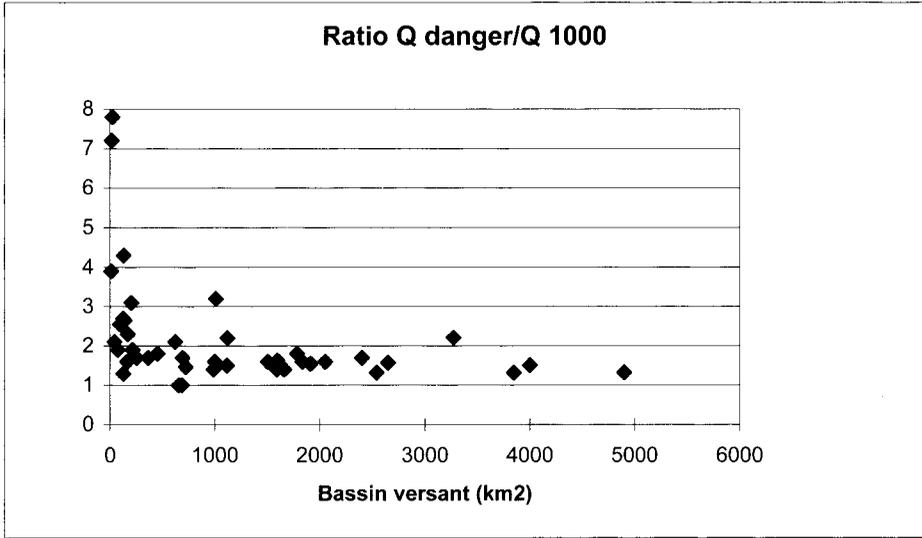


Figure 1 : Ratio Q danger / Q 1000 pour les barrages en béton du parc EDF

3. Le risque séisme

La France est située dans un contexte géologique favorable vis à vis du risque séisme, à l'exception de quelques régions localisées. D'autre part, la réglementation parasismique ne s'appliquant pas aux barrages, ceux ci doivent faire l'objet de mesures adaptées au cas par cas. C'est la raison pour laquelle, sous l'égide du ministère de l'Industrie, une méthode de classement des barrages vis à vis des séismes a été mise au point dans les années 1990 (Dubié J.Y., Le Delliou P., 2003), et a été utilisée pour l'étude « risque séisme » des barrages PPI.

Cette méthode de classement repose sur une analyse multicritère tenant compte :

- des caractéristiques propres du barrage (type, fondation, age, comportement) ;
- des conséquences potentielles en cas de rupture ;
- de la sismicité du site.

L'application de cette méthodologie conduit à identifier, pour EDF, moins d'une dizaine de barrages PPI sensibles aux séismes, pour lesquels des études de réévaluation ont été entreprises.

4. Le risque glissement de terrain

On distingue trois effets possibles pour le barrage d'un effondrement de terrain dans une retenue :

- création d'une vague pouvant submerger le barrage ;
- impact direct sur le barrage pouvant endommager des organes vitaux de l'ouvrage (vannes, bâtiment de commande...) ;
- création d'un « barrage » naturel dans la retenue, par partition (le mouvement de terrain vient boucher la retenue jusqu'à une cote supérieure à la cote normale d'exploitation) ou par obstruction (la hauteur de bouchon est inférieure à la cote normale, et des problèmes peuvent apparaître lors de vidanges).

Les éventuels autres effets (notamment ceux concernant des tiers à l'amont du barrage) ne sont pas étudiés.

Electricité de France possède une expérience considérable dans la gestion des mouvements de versants du fait de l'importance de son parc hydroélectrique comportant des sites parfois sensibles. Cette expérience couvre :

- la gestion de mouvements de terrains déclarés ;
- la gestion préventive de glissements potentiels susceptibles de mettre à mal la sûreté des ouvrages.

Au cours des dernières années, cette expérience s'est enrichie du fait des acquisitions par EDF d'aménagement hydroélectriques en Argentine, dans les Andes. Les retenues sont implantées dans des formations volcaniques et volcano-sédimentaires hétérogènes et affectées par de nombreux glissements.

La démarche (Dubié J.Y., 1996) débute toujours par une étude géologique précise dont les objectifs sont multiples :

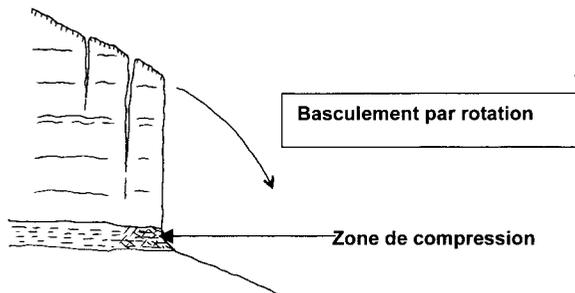
- déterminer les caractéristiques géométriques de la zone instable : limites en surface et volume ;
- déterminer la nature géologique des formations instables, de façon à en apprécier la cohésion ;
- rechercher l'existence ou non de surfaces de glissement ;
- comprendre l'hydrogéologie du massif ;
- apprécier le caractère monolithique ou, au contraire, très fragmentaire de la zone instable ;
- typer la zone instable de façon à la rattacher à un type de glissement connu ;
- évaluer les éléments topographiques pour apprécier l'énergie potentielle accumulée au niveau de la zone instable et pour apprécier l'énergie cinétique mobilisable ;
- évaluer l'ordre de grandeur de la vitesse de glissement lors de son arrivée dans le lac ;
- estimer l'ordre de grandeur de la hauteur de la vague créée, lors de l'arrivée dans le lac. Celui-ci dépend de la vitesse et du caractère monolithique de la zone instable ;
- apprécier le caractère en cours, ou plus ou moins imminent, de l'instabilité du mouvement de terrain.

Le diagnostic géologique peut conclure à l'innocuité de la zone instable, ou à sa dangerosité. Il peut aussi conduire à une demande d'auscultation, des reconnaissances, des calculs de stabilité plus ou moins sophistiqués, des travaux (création de butées de pied ou drainage, en surface ou par des drains forés à partir de galeries).

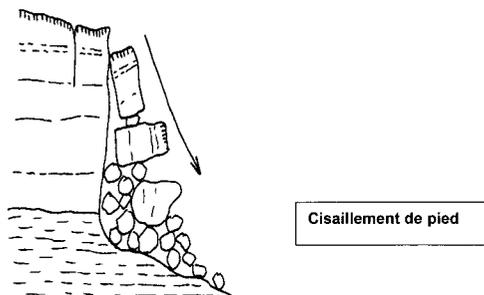
4.1 Les types de mouvements de terrains

A côté des coulées de boue et des chutes de blocs qui, en général, ne concernent que de faibles volumes sauf cas particuliers, les mouvements de terrain peuvent être répertoriés selon les grandes catégories suivantes :

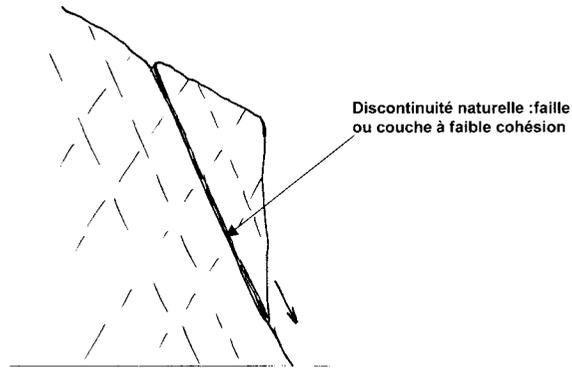
- Basculement de falaise par décohéson et rotation (mouvement monolithique à vitesse élevée)



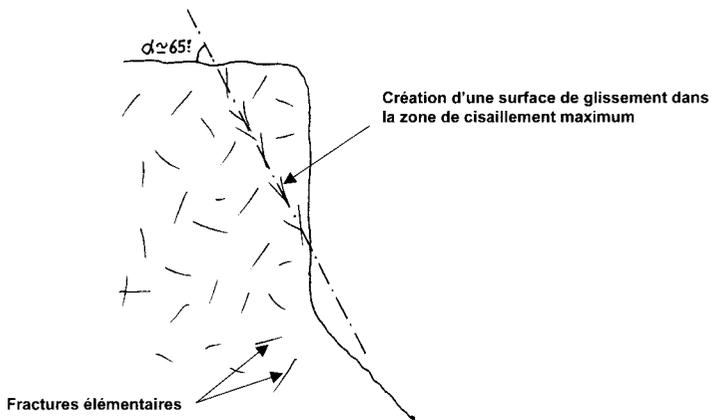
- Effondrement de falaise par cisaillement de pied (mouvement fragmentaire à vitesse élevée)



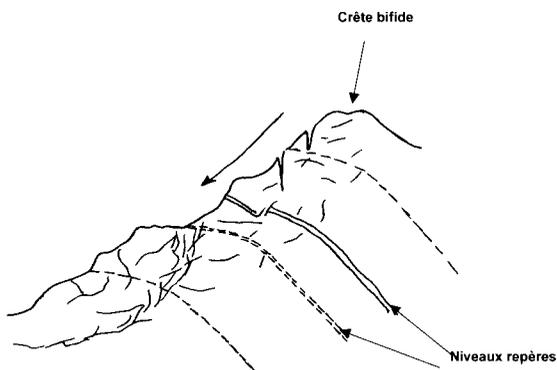
- Glissement par décohesion et cisaillement selon une couche faible ou une faille, ou glissement banc sur banc (mouvement monolithique à vitesse élevée - type Vajont)



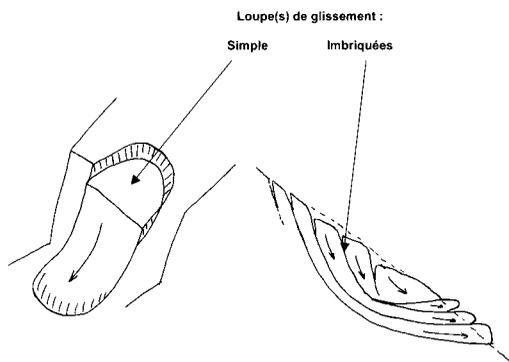
- Glissement par décohesion selon une surface de cisaillement maximum reliant des fractures élémentaires du massif (mouvement monolithique à vitesse élevée)



- Glissement de massifs rocheux par décohesion très lente (1 000 à 10 000 ans) entraînant le fauchage du versant (mouvement monolithique à vitesse généralement lente)



- Glissement de masses à très faible cohésion ou glissements rotationnels de loupes imbriquées (mouvement monolithique à vitesse lente)



La principale difficulté de l'expertise géologique consiste à apprécier le caractère plus ou moins imminent de la rupture, en d'autres termes si une certaine évolution des paramètres géologiques est nécessaire pour rompre un équilibre métastable.

4.2 Application de la démarche PPI aux retenues EDF

Il s'agissait de faire le lien entre les types d'instabilité recensés ci-dessus et la proximité de la retenue.

La démarche suivie par EDF pour cette étude a comporté :

- Une phase de collecte et d'analyse des données existantes, concernant les éventuels mouvements de terrain connus ou potentiels, sur le pourtour de la

retenue ou à sa proximité. Ces données sont disponibles soit dans des documents internes à EDF, soit auprès d'organismes extérieurs (RTM, DDE, CETE, SNCF, etc.).

- Une phase de terrain consistant à rassembler le maximum d'observations d'ordre géologique, géomorphologique et hydrogéologique, à un instant donné. Certains indices de surface et morphologiques permettent d'identifier des zones susceptibles d'évolution. Les moyens nécessaires à cette phase de terrain peuvent être assez lourds : bateau, hélicoptère, intervention acrobatique en falaise... Cette phase de collecte des données de terrain a été guidée et complétée par l'analyse de photographies aériennes.
- Une analyse de l'aléa "Mouvement de terrain" en fonction de la géologie structurale *en grand* des versants. En effet, une structuration défavorable des formations géologiques dans un versant (plongement des couches dans le sens de la pente, vers la retenue) peut être propice au déclenchement d'un mouvement de terrain en cas de circonstances particulièrement pénalisantes (épisode pluvieux exceptionnel, vidange rapide), tandis qu'une structuration favorable (plongement vers l'intérieur du massif, s'il n'y a pas fauchage) permet d'écarter virtuellement toute potentialité de mouvement de moyenne à grande ampleur.

Chaque zone potentielle de mouvement a fait l'objet d'un repérage sur un fond topographique au 1/10 000^{ème} recensant également tous les indices et observations relatifs à la zone, et d'une fiche descriptive et analytique autoportante. En particulier, sur cette fiche figure l'estimation de tous les paramètres évoqués au paragraphe 1, en particulier les éléments géométriques de la zone instable, la potentialité d'occurrence du glissement, y compris dans la retenue, la vitesse probable d'arrivée dans la retenue, la nature du risque (partition ou vague), etc...

Le rôle de la retenue sur le comportement d'une zone potentiellement instable est signalé le cas échéant. L'analyse de ce rôle peut parfois conduire à des consignes particulières d'exploitation (limitation de la cote du marnage, etc.).

Les différentes zones de mouvements potentiels ont été classées selon la potentialité d'occurrence d'un glissement dans la retenue suivant une échelle de trois couleurs, définie comme suit :

- Potentialité forte (rouge) : la structure et l'état actuel des matériaux sont tels que la modification d'un paramètre (pression interstitielle, cohésion, etc...) peut suffire à la mise en mouvement des masses instables et provoquer leur arrivée dans la retenue.
- Potentialité moyenne (jaune) : une certaine évolution de la zone instable est nécessaire, mais possible, pour se retrouver dans le cas précédent.
- Potentialité faible (vert) : ces zones sont reconnues sujettes à des mouvements, ou potentiellement instables, mais :

- soit leur configuration réduit considérablement le risque d'arrivée jusqu'à la retenue (distances importantes) ;
- soit elle induit un étalement sur le plan spatial (disposition géométrique des matériaux) et/ou temporel (évolution très lente) ;
- soit elle conduit à l'arrivée dans la retenue de volumes très limités (de l'ordre de quelques centaines de m³).

4.3 Les résultats

Au total, 255 mouvements de terrain déclarés ou potentiels ont été recensés sur les versants des 67 retenues étudiées. 58 % de ces mouvements ont été classés en vert (potentialité d'occurrence dans la retenue faible) et 23 % en rouge (potentialité d'occurrence forte). La figure 2 illustre la répartition de ces 255 mouvements de terrain en fonction du type de mouvement mis en jeu et de la potentialité d'occurrence associée.

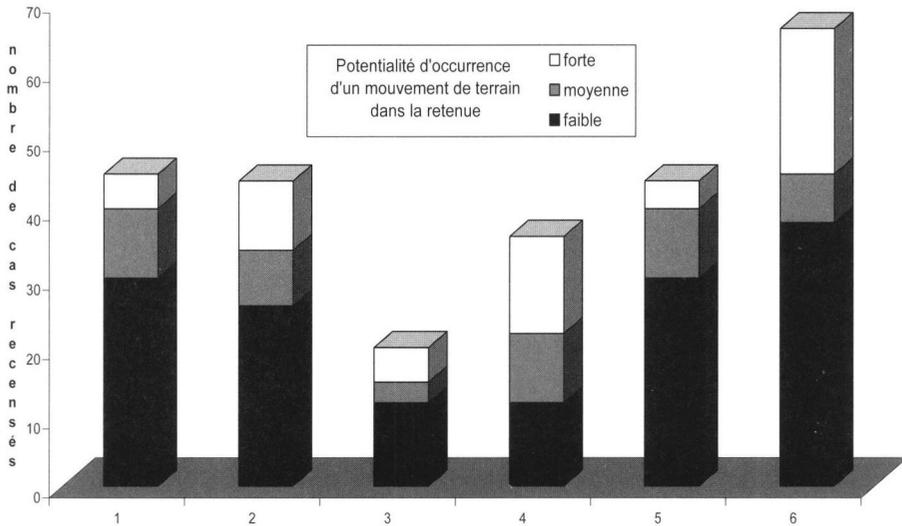


Figure 2 : Répartition des 255 mouvements de terrain déclarés ou potentiels recensés sur les 67 retenues EDF – 1) chutes de blocs ; 2) éboulement par basculement ou cisaillement en pied ; 3) éboulement et glissement banc sur banc ; 4) glissements rotationnels ; 5) glissement de matériaux initialement cohérents ayant perdu leur cohésion suite à des phénomènes de versant ; 6) écoulements (fluage, solifluxion, ravinement et coulées boueuses).

Parmi ces 255 mouvements déclarés ou potentiels, 65 sont suivis : 31 sont surveillés par l'exploitant (surveillance visuelle, prise régulière de photos...) et 34 sont auscultés. La répartition de ces 34 zones auscultées montre que :

- 19 zones (soit 56 % des cas) sont concernées par l'aléa création d'une vague ;

- 9 zones (soit 27 % des cas) sont concernées par l'aléa partition/obstruction ;
- 4 zones soit 12 % sont concernées par l'aléa impact direct sur l'ouvrage ;
- 2 zones sont concernées par des aléas qui ne rentrent pas dans le cadre des PPI (stabilité de pylônes, affaissements routiers).

Les chutes de blocs caractérisent des éboulements de masses rocheuses éparses et/ou étalées dans le temps. Le risque associé est un impact direct sur l'ouvrage, ce qui représente une faible proportion des chutes de blocs recensées. L'exemple le plus significatif est celui de l'appui rive gauche du barrage de Pla de Soulcem, dans les Pyrénées, qui a nécessité des dispositions particulières de protection du masque amont lors de la conception, et d'alarme par géophones disposés sous le parement du barrage. Les informations, en cas de chute de blocs, sont télétransmises à l'usine.

Le **risque de création de vague** pouvant submerger le barrage est associé aux mouvements pouvant mettre en jeu, à de fortes vitesses, des volumes très importants et monolithiques. Le risque potentiel concerne essentiellement les glissements de type banc sur banc (cas de la Pelloud, retenue de Monteynard dans les Alpes) et les éboulements par basculement/cisaillement de pied de falaise (cas du Chastel dans le Massif Central), pour lesquels la cinétique de glissement est brutale et imprévisible. Dans une moindre mesure, il concerne aussi certains glissements rotationnels (cas du Billan) associés à des phénomènes de versant ayant conduit à une perte de la cohésion en grand du massif.

Les caractéristiques de la vague générée sont fonction de la vitesse d'arrivée, mais aussi de la surface du front de glissement dans la retenue. Sa propagation dépend de la forme de la retenue. Ces calculs sont délicats et entachés de grandes incertitudes. Pour les cas les plus critiques, des modélisations physique ou numérique du glissement et de la retenue sont nécessaires.

A titre d'exemple, concernant la configuration de glissement de type banc sur banc, on citera le promontoire de La Pelloud situé à 1 500 m à l'amont du barrage de Monteynard sur le Drac. Les plans de stratification, pentés de 45 à 50° vers la retenue, laissaient craindre le glissement banc sur banc d'un volume monolithique de plusieurs centaines de milliers de m³, non buté en pied.

Le système d'auscultation anciennement mis en place, qui consistait en un réseau d'observation angulaire avec des mesures de périodicité annuelle et un réseau de nivellement avec des mesures de périodicité quinquennale, se révéla inadapté à l'aléa.

Une reconnaissance en falaise de la nature et de l'état de la stratification fut décidée. Elle révéla que les hypothétiques plans de glissement étaient des joints fermés, recoupés par la schistosité verticale et disparaissant localement entre les plans de schistosité et de fractures. Ces joints, très ténus, sont pratiquement

invisibles en falaise, et ne demeureraient visibles que depuis la rive opposée, car ils sont soulignés par un léger sous-cavage de gélifraction (Vaast et al, 1998).

Le risque de glissement banc sur banc fut par conséquent écarté, car les plans de glissement, ondulés et très rugueux en grand, présentent un angle de frottement et une cohésion suffisante. L'intervention en falaise, délicate à mettre en œuvre, se révéla donc très efficace puisqu'elle permit d'éviter des investigations lourdes et coûteuses.

A l'inverse, le glissement du Billan, apparu en rive droite de la retenue du barrage de Grand Maison dans l'Isère, lors de la mise en eau de la retenue, a dû être stabilisé par un voile de drainage réalisé à partir d'une galerie. Il s'agit d'un glissement de type rotationnel affectant un versant rocheux dont la cohésion a été amoindrie par d'importants phénomènes de fauchage.

Le risque d'obstruction/ partition de la retenue existe pour tous les types de glissements, mais il concerne surtout les glissements rotationnels dans les matériaux meubles et les écoulements (coulées de boues, solifluxion...) situés en bordure de retenues étroites. En général, les vitesses et les volumes élémentaires demeurent trop faibles pour présenter un risque réel pour l'ouvrage. L'impact des mouvements de versant se traduit alors par un alluvionnement et une perte de la capacité utile du réservoir. C'est par exemple le cas des glissements en loupes imbriquées du tiers amont de la retenue de Vouglans sur l'Ain.

4.4. Gestion du risque mouvements de terrain à EDF

L'approche d'EDF, en cas de crise, repose sur les grands principes suivants :

- rapidité de réaction conduisant, à partir d'un premier diagnostic géologique, à la mise en place d'une auscultation sommaire ;
- diagnostic géologique approfondi conduisant, si nécessaire, à des reconnaissances et des modélisations ;
- le cas échéant, adaptation des consignes d'exploitation de la retenue aux résultats de l'étude ;
- mise en place d'un système d'alerte sur la zone instable ou dans la zone menacée, avec définition de seuils d'alerte ;
- en cas de nécessité, définition de travaux de confortement ou de drainage.

Les actions proposées par EDF dans la gestion des mouvements de versants sur les grands ouvrages hydroélectriques sont systématiquement soumises à l'approbation du Comité Technique Permanent des grands Barrages (CTPB).

L'exploitant du barrage est le maillon essentiel du dispositif de gestion du risque. Il recueille les données du dispositif d'auscultation, assure la surveillance visuelle des versants de la retenue qu'il exploite et déclenche, le cas échéant, une procédure d'alerte. Sa sensibilité aux phénomènes de mouvements de versant est

donc fondamentale. Il doit être en mesure d'analyser sommairement les données qu'il acquiert et doit être attentif aux indices d'activation (ou de réactivation) d'un glissement de terrain. Des stages de sensibilisation, animés par des géologues, sont régulièrement mis en place dans cette optique.

Il ne doit pas être perdu de vue qu'en géologie, une analyse de stabilité des pentes, fût-elle de type PPI, représente l'examen d'un état à un instant donné. Avec le temps, les paramètres géologiques évoluent soient imperceptiblement, par vieillissement, soit brutalement, par crises, au cours de phénomènes météorologiques exceptionnels. Toute étude doit donc être réactualisée si des éléments nouveaux apparaissent, ne serait ce que pour confirmer des diagnostics antérieurs établis à partir d'une science qui n'est pas une science exacte.

Bibliographie

- Bister D., Le Delliou P. – Analyse de risque et crue de danger, 20° Congrès International des Grands Barrages, Beijing 2000 – Q76, R36
- Bordet C., Maillet P. – Notes internes EDF sur les glissements de terrain.
- Devèze G, Dubié J.Y. (EDF), Thomaidis C. (IGAL)– Mouvements de versants des retenues hydroélectriques. Retour d'expérience et gestion du risque. Revue française de géotechnique n° 95/96 (2001)
- Dubié J.Y. - Note interne EDF définissant la cohérence des études géologiques dans le cadre des PPI ; 1996
- Dubié J.Y., Le Delliou P. – Méthode de classement synthétique des barrages vis à vis du risque sismique, 21° Congrès International des Grands Barrages, Montréal 2003 – Q83, R45
- Le Delliou P. – Les plans particuliers d'intervention – revue Barrages n° 33, 3° et 4° trimestre 2000
- Vaast J.S., Deveze G., Durouchoux C. – Barrage de Monteynard – Analyse de l'aléa de mouvements de terrain dans la retenue, note interne EDF, 1998.

La prévention des risques à l'aval des barrages

Risk prevention downstream of dams

Jean-Yves Delacoux

EDF – Branche Energies – Division ENERTHY

1, Place Pleyel – Site Cap Ampère – 93282 SAINT DENIS Cedex

Tel 01 43 69 25 69

Fax 01 43 69 31 94

E.mail : jean-yves.delacoux@edf.fr

Pierre Valiron et Drac 95

Tél 04 76 51 47 87 - Fax 04 76 44 88 21

E.mail : Pierre.Valiron@obs.ujf-grenoble.fr

Fédération Nationale des Victimes d'Accidents Collectifs

7, rue Geoffroy Saint-Hilaire – 91000 EVRY

Tél 01 60 77 82 85 – Fax 01 60 78 35 51

Résumé

La coopération établie entre la Fédération Nationale des Victimes d'Accidents Collectifs (FENVAC) et EDF a permis de réaliser des progrès déterminants en matière de sécurité dans les rivières à proximité des centrales hydrauliques. La FENVAC a joué un rôle d'aiguillon par une remise en cause des pratiques et l'évaluation des solutions proposées. S'appuyant sur l'expérience acquise dans la production nucléaire, EDF a développé le concept de sûreté hydraulique, a mis en place un dispositif de cotation des événements, et a fait évoluer un certain nombre de méthodes d'exploitation. L'accent a été mis sur l'information et la sensibilisation du public. A l'appui de cette démarche, un travail de concertation et d'échange a été développé entre la FENVAC et EDF, sur les risques de noyade, mais aussi sur les risques d'électrocution liés au transport d'électricité. Dans l'Isère, ce travail a pris une forme très concrète, en liaison avec les Pouvoirs Publics, les élus et différentes associations.

Abstract

The cooperation between FENVAC and EDF permitted to make major progresses in term of safety in the rivers, near hydroelectric power plants. FENVAC acted as a spur to question practises, and to evaluate suggested solutions. Taking in account the experience gained in nuclear generation, EDF developed the concept of hydraulic safety, put in place a scale to evaluate events, and changed some methods of operation. The emphasis has been put on public information and sensitisation. As a support, FENVAC and EDF have worked together on drowning risks, but also on risks of electrocution linked with the electric network. In Isère, this work took a very concrete form, in close contact with public authorities, elected representative, and associations.

Mots-clés : prévention des risques, centrales hydrauliques, information du public

Keywords : *risk prevention, hydropower plants, information of the public*

Introduction

Le 4 décembre 1995, à la suite d'un lâcher d'eau d'exploitation depuis le barrage de Notre-Dame de Commiers sur le Drac en Isère, six enfants d'une école de Grenoble et une accompagnatrice furent noyés.

Ce drame, le plus important qu'ait connu un aménagement hydroélectrique en exploitation, provoqua une émotion considérable au sein d'EDF et dans le public. Il conduisit EDF à une révision en profondeur de la prévention des risques à l'aval des ouvrages qui se traduit par :

- . une analyse approfondie des risques pour chaque ouvrage hydraulique ;
- **une amélioration considérable de l'information du public ;**
- . des modifications des règles d'exploitation ;
- . la mise sous « Assurance Qualité » des processus hydrauliques et en premier lieu, ceux intéressant la sécurité publique.

Cette évolution aboutit à la définition d'une politique de « Sûreté Hydraulique » comprenant notamment la mise en place d'un Indicateur de Sûreté Hydraulique.

Ces actions furent menées par une mobilisation importante, à tous les niveaux et dans toutes les régions, du personnel de la production hydraulique d'EDF, mais aussi en concertation avec les pouvoirs publics concernés et des associations d'usagers des cours d'eau.

Mais la coopération la plus significative fut sans conteste celle qui se réalisa entre EDF et la Fédération Nationale des Victimes d'Accidents Collectifs (FENVAC), et plus précisément l'association « Drac 95 - Enfance et Prévention », adhérente de la FENVAC et composée des familles des victimes du drame du 4 décembre 1995. Cette coopération fut engagée à l'initiative conjointe de l'association qui en formula la demande d'une manière solennelle à EDF devant la Cour d'Appel de Grenoble lors du procès consécutif au drame et de la FENVAC.

Le but de cet exposé commun est, pour EDF, de présenter cette évolution de la prévention des risques à l'aval des barrages et pour « Drac 95 - Enfance et Prévention », de montrer sa perception de ce travail en commun en développant plus particulièrement ce qui a été réalisé en Isère.

Les premières mesures prises par EDF après le drame

Dans les semaines qui suivirent le 4 décembre et sans attendre les conclusions des enquêtes diligentées par la Justice ou par les pouvoirs Publics, les responsables de la Production Hydraulique d'EDF décidèrent de renforcer considérablement la signalétique d'information du public dans tous les aménagements hydroélectriques. Ils engagèrent aussi une analyse de tous les ouvrages (plus de 1300) afin de les classer selon le degré de gravité du risque et mettre en œuvre des mesures compensatoires pour les sites les plus exposés.

En agissant ainsi, ils prenaient acte qu'un accident gravissime était survenu et qu'il était nécessaire de tout faire pour éviter qu'un événement semblable ne se reproduise, et cela sans préjuger des responsabilités qui seraient reconnues ultérieurement.

Des actions engagées sur la durée Des modifications d'exploitation

Comme indiqué précédemment, à la suite de l'accident du Drac, une analyse approfondie des risques présentés par l'exploitation des aménagements hydroélectriques fut engagée par EDF et des premières corrections furent apportées pour limiter le danger, en améliorant notamment la procédure du débit d'alerte ou en atténuant les vitesses de variation.

Mais surtout, des essais de lâchers en vraie grandeur furent réalisés sous le contrôle des DRIRE afin d'apprécier d'une manière complète leurs effets et en déduire les modifications d'exploitation à effectuer ou les recommandations à formuler pour améliorer la sécurité. L'intérêt de ces essais initiés par EDF fut confirmé par une circulaire interministérielle de 1996 traitant de la sécurité des tiers aux abords des ouvrages hydrauliques.

La mise sous Assurance Qualité

Les services de la Production Hydraulique d'EDF avaient dès 1994 engagé le projet de mettre sous Assurance Qualité les activités d'exploitation et de maintenance dans plusieurs sites pilotes. Les réflexions entreprises à la suite de l'accident du Drac en accélérèrent la mise en œuvre pour toutes les activités susceptibles de mettre en cause la sécurité publique et de maîtriser les risques associés.

Les analyses conduites pour la mise sous Assurance Qualité englobèrent l'ensemble des risques liés aux aménagements hydroélectriques, c'est à dire :

- *le risque « rupture de barrage »*, dont l'occurrence est très faible mais les conséquences catastrophiques ;
- *le risque « crue »*. La crue est un phénomène naturel mais les ouvrages hydrauliques ne doivent en aucun cas en aggraver les conséquences ;
- *le risque lié aux lâchers d'eau en exploitation*. Ces lâchers sont nécessaires à l'exploitation, mais ils peuvent être générateurs de risques. Les manœuvres sont le plus souvent automatiques et les variations de débit importantes ;
- *le risque d'atteinte à l'environnement*. Les aménagements hydroélectriques sont insérés dans un milieu naturel et leur exploitation se doit d'en intégrer la protection.

L'information préventive du public

L'engouement du public pour les activités de plein air entraîne une fréquentation importante des cours d'eau, ce qui accroît les risques mais il ne pouvait être question, ni pour EDF, ni en général pour les pouvoirs publics, d'interdire l'accès

aux berges. Cette solution fut néanmoins retenue pour le site du Drac, lieu du drame, mais de l'avis de tous, cela ne devait être qu'une solution temporaire, dans l'attente de dispositions d'exploitation sécurisées.

L'amélioration de l'information du public est donc devenue un objectif prioritaire des équipes hydrauliques d'EDF, avec comme « cibles » principales le grand public et les touristes, les élus et les collectivités locales, les partenaires de la rivière (pêcheurs, canoë-kayak, canyoning, ...) et bien sûr les médias. Des efforts particuliers ont été développés en direction des enfants des écoles et des colonies de vacances, des enseignants et des professionnels des activités de plein air.

Pour cette information, de nombreux supports de communication ad hoc ont été développés, notamment affiches, tracts, dossiers pédagogiques, livrets ludiques, dépliants adaptés aux sites, la diffusion en étant assurée en collaboration avec des organismes locaux : associations, syndicats d'initiative, offices de tourisme et collectivités locales. Ces dispositions complètent les 12000 panneaux d'avertissement, auxquels s'ajoutent ceux adaptés à la situation de chaque site. Des journées « Portes Ouvertes » ont également été organisées dans de nombreux sites. Enfin, l'embauche pendant l'été de nombreux jeunes « guides de rivières », a été développée. En définitive, la synthèse de toutes ces actions fut réalisée par la mise en place d'une politique de sûreté hydraulique.

La Sûreté Hydraulique

La sûreté hydraulique à EDF est constituée de l'ensemble des dispositions prises lors de la conception et de la gestion des aménagements hydroélectriques pour assurer la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les risques liés à l'eau et dus à la présence ou au fonctionnement des ouvrages.

Les objectifs de la politique de sûreté hydraulique

La politique de sûreté hydraulique permet d'indiquer clairement les objectifs que toute entité doit atteindre :

- exploiter les aménagements hydroélectriques en toute sécurité, en identifiant les risques et en prenant les dispositions nécessaires ;
- formuler et clarifier les exigences relatives à la sûreté hydraulique dans la doctrine de conception et d'exploitation des aménagements hydroélectriques en prenant en compte tous les aspects juridiques et réglementaires ;
- obtenir le respect permanent des exigences de sûreté et la garantie des gestes élémentaires relatifs à la sûreté en s'assurant de l'implication des acteurs dans l'application des règles ;
- assurer un retour d'expérience pertinent et efficace prenant en compte l'ensemble de aspects techniques, organisationnels et humains ;
- définir le rôle des différentes entités intervenant dans le domaine de la conception, de l'exploitation et du contrôle des aménagements hydroélectriques.

Les principes directeurs de la politique de sûreté hydraulique

Ils consistent à définir les exigences à atteindre pour garantir le niveau de sûreté, et à s'assurer de leur respect. Ce qui signifie :

a) *Elaborer un référentiel de sûreté commun à tous les acteurs*

Les conditions de conception et d'exploitation des aménagements hydroélectriques sont précisées dans des directives qui constituent le « Référentiel de la Sûreté Hydraulique ». Ces documents concernent les activités stratégiques que sont la maintenance des matériels intéressant la sûreté, la gestion des crues, la maîtrise des variations de débit et la vidange des retenues. Comme indiqué précédemment, ces activités sont mises sous Assurance Qualité dans un cadre de cohérence nationale, et en conformité avec la norme ISO 9001. L'ensemble des Groupes d'Exploitation Hydraulique (GEH) sont effectivement certifiés à ce jour.

Faits \ niveaux	A Atteinte aux personnes	B Atteinte aux biens	C Cote non maîtrisée	D Débit non maîtrisé	S Situation non sûre
6	Plusieurs morts				
5	1 mort				
4	Personnes blessées	Dégâts irréversibles			
3	Personnes mises en difficulté	Dégâts très importants			
2		Dégâts importants	Cote très différente du souhaité	Débit très différent du souhaité	
1		Dégâts mineurs	Cote différente du souhaité	Débit différent du souhaité	
0	Personnes potentiellement en danger	Dégâts potentiels	Cote non souhaitée	Débit non souhaité	

Figure 1 : grille de cotation des événements significatifs pour la sûreté hydraulique (ESSH)

b) *Evaluer le niveau de sûreté : l'Indicateur de Sûreté Hydraulique (ISH)*

Dans la gestion d'un aménagement hydraulique, il se produit des faits ou des situations d'exploitation non souhaités et certains d'entre eux sont révélateurs d'un

niveau de sûreté insuffisant. Ce sont les Evénements Significatifs pour la Sûreté Hydraulique (ESSH) qui sont classés selon les thèmes suivants (fig. 1) :

- accident de personnes ;
- atteinte aux biens publics et privés ou à l'environnement naturel ;
- cote de retenue non maîtrisée ;
- débit évacué non maîtrisé ;
- situations « non sûres ».

Afin de mesurer le niveau de sûreté hydraulique atteint par les aménagements hydrauliques, en s'appuyant sur l'expérience acquise pour la Sûreté Nucléaire, un Indicateur de la Sûreté Hydraulique a été mis en place avec deux objectifs :

- externe, vers les pouvoirs publics, le grand public et les médias, afin de donner confiance dans la capacité d'EDF à maîtriser son activité et apprécier la réalité et l'efficacité des démarches engagées pour la sûreté (fig. 2) ;
- interne, afin de sensibiliser et motiver l'ensemble du personnel et fournir un retour d'expérience qui permet de mesurer les progrès réalisés.

Tous les Evénements Significatifs de la Sûreté Hydraulique (ESSH) sont ainsi détectés, comptabilisés, et analysés. Les simples dysfonctionnements sont classés " 0 ". Ils sont par nature inévitables, mais leur collecte permet à la fois de s'assurer de la vigilance du personnel et d'anticiper sur des événements plus graves.

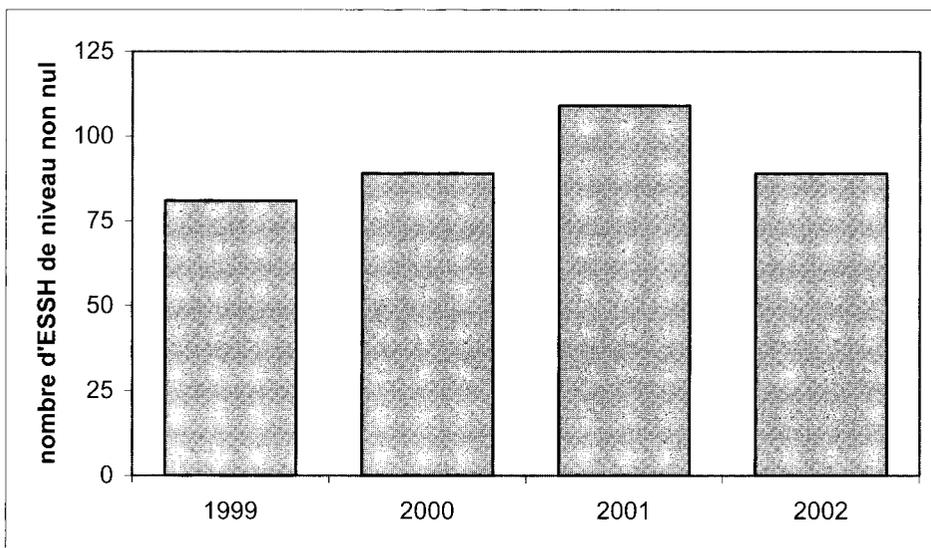


Figure 2 : Evolution de l'indicateur de sûreté hydraulique (ISH) depuis 1999

Les événements ayant eu une répercussion sont classés sur une échelle de gravité codifiée de 1 à 6. L'ISH est égal au nombre total d'événements classés de 1 à 6. En bas de l'échelle, l'indicateur recense tous les incidents

(pannes, mauvais respect des procédures d'exploitation...) qui auraient pu conduire à des dommages matériels ou corporels. En haut de l'échelle figurent les accidents corporels, l'indice le plus élevé étant attribué aux conséquences mortelles.

Cet indicateur est déployé sur l'ensemble des installations hydrauliques d'EDF depuis 1999 (figures 2 et 3) et constitue un outil essentiel pour le suivi à moyen et long terme des efforts de l'Entreprise pour améliorer la sûreté d'exploitation de ses installations et pour mieux identifier les priorités en matière de prévention.

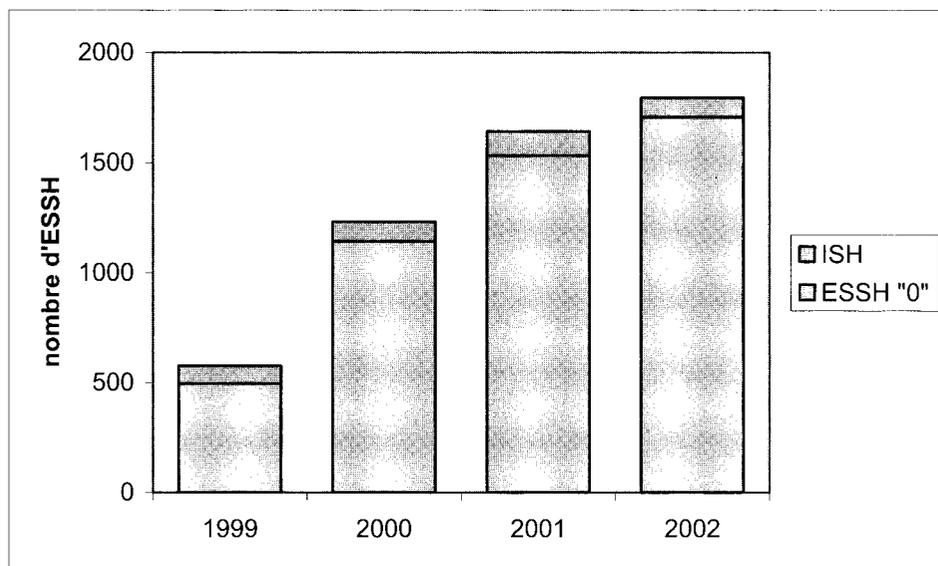


Figure 3 : Evolution du nombre total d'ESSH depuis 1999

Lors de la mise au point de l'ISH, des échanges eurent lieu entre les responsables de la Production Hydraulique d'EDF et les représentants de la FENVAC, parmi lesquels les animateurs de l'association « Drac 95 - Enfance et Prévention »

Le dialogue national entre EDF et la FENVAC

Depuis mai 1998, des échanges ont lieu entre la FENVAC et EDF sur les risques présentés par l'Entreprise Publique dans ses différents secteurs opérationnels : production hydraulique, thermique, nucléaire, ainsi que le transport et la distribution d'électricité.

Comme cela a été indiqué précédemment, pour la production hydraulique, les échanges ont commencé, à l'initiative de « Drac 95 - Enfance et Prévention » après le procès en appel de l'accident du Drac.

Au delà de l'affliction et de la révolte, l'association Drac 95 était en effet animée de la volonté de faire tirer toutes les leçons de cette catastrophe pour rendre

hautement improbable tout nouvel accident. Drac 95 a été grandement soutenue dans ce passage difficile de « l'affliction à la prévention » par la FENVAC, qui avait déjà entrepris une démarche similaire auprès de la SNCF, et par la qualité des expertises et de l'instruction du dossier pénal. Depuis, d'autres associations de la FENVAC ont entrepris des actions similaires, avec l'Education Nationale pour la réécriture des directives concernant les sorties scolaires, avec Gaz de France suite à la catastrophe de Dijon, pour la sécurisation des tunnels routiers suite à l'incendie dans le tunnel du Mont Blanc, etc. Cette immixtion constructive des victimes dans la prévention des risques a même suscité la tenue d'un colloque².

Au delà de la charge émotionnelle, les premiers échanges avec EDF étaient très dissymétriques. Les participants associatifs ont apporté un rôle d'aiguillon par une remise en cause systématique des pratiques et des situations à risque, tandis qu'EDF avait la connaissance des sites et la capacité technique et opérationnelle. Même si, au fil du temps, Drac 95 et la FENVAC ont beaucoup appris sur EDF, les participants associatifs n'ont jamais souhaité se départir de leur rôle de témoins extérieurs et de leur regard de simples citoyens non spécialistes.

Les situations d'exploitation d'EDF étant très diverses, les échanges ont porté sur des études de cas dans les différents secteurs : risques de noyade liés à l'exploitation hydraulique, risques d'électrocution liés au transport et à la distribution d'électricité, en associant les directions concernées et la direction de l'Environnement.

Ces échanges très ouverts et « sans tabous » ont permis de constater des disparités dans les procédures de sûreté en vigueur dans les diverses branches de l'Entreprise.

La FENVAC a donc souhaité qu'EDF mette en place des transferts de savoir-faire pour généraliser ses meilleures réalisations, en prenant appui dans la mesure du possible sur les procédures de sûreté validées pour le secteur nucléaire en raison de leur rigueur particulière et de la durée importante du retour d'expérience correspondant.

Le dialogue s'est poursuivi en approfondissant des sujets complexes appuyés sur des études de cas :

- un accident peut être aggravé par l'enchaînement d'incidents d'origines différentes qui déconcertent les opérateurs. Comment gérer ces problèmes ?
- comment mieux prendre en compte l'influence du facteur humain chez les exploitants, le public ou les accompagnateurs (manque de vigilance, mauvaise perception des risques, effets de panique,...) ?
- comment communiquer en matière de risques avec les jeunes et le grand public ? Cela rejoignait la préoccupation d'information du public d'EDF et il a été décidé de réaliser des expérimentations régionales en Isère.

² « Associations de victimes de catastrophes : de l'affliction à la prévention », sous l'égide du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 3 oct 2003

Le retour d'expérience croissant des ESSH depuis fin 1999 a permis de confirmer le risque particulier au niveau des jeunes et des groupes de jeunes. Il apparaît également une catégorie d'incidents préoccupants à l'amont des barrages (aspiration d'individus ou d'embarcations évitée de justesse), qui sont difficiles à prévenir par des protections passives et qui sont actuellement très mal pris en compte par la politique de sûreté hydraulique.

Les actions en Isère

L'Isère est le département français qui cumule le plus de risques naturels et industriels (éboulements, avalanches, crues torrentielles, voire tremblements de terre mais aussi exploitation de grands barrages, nucléaire civil, industrie chimique lourde). La cuvette grenobloise et ses abords immédiats, très peuplés, sont au carrefour de tous ces risques, tandis que le tourisme et les activités de plein air sont très pratiqués, notamment en montagne et le long des cours d'eau. Les actions de prévention sont compliquées en Isère par la conjonction possible des risques naturels et technologiques et par la multiplicité des publics concernés (famille, touristes, sportifs..) et des acteurs (administrations, parcs régionaux, syndicats d'aménagement, industriels...).

« Drac 95 - Enfance et Prévention » a donc considéré que l'Isère constituait un site particulièrement adapté pour expérimenter et valider des approches de prévention des risques, en espérant que les actions réussies seraient applicables à d'autres régions.

Dialogue entre « Drac 95 - Enfance et Prévention » et EDF en région

Un travail de concertation et d'échanges a été entrepris entre « Drac95 » et les responsables de la production hydraulique d'EDF de la région Alpes.

Les points suivants ont été particulièrement abordés :

- les spécificités des différents ouvrages et de leur exploitation ;
- la diversité de la fréquence et de l'importance des lâchers d'eau ;
- l'impact de la variabilité naturelle des débits et des crues ;
- la diversité de la fréquentation des sites ;
- la possibilité sur certains ouvrages ou certains sites de compléter les signalisations passives (panneaux) par des signalisations actives (sirènes ou messages vocaux, passage de véhicules spécialisés, etc.) ;
- le rôle possible des « emplois verts » pour mieux informer le public sur les parcours autorisés, sur la réglementation, et sur les différents risques. Par exemple, dans le cadre des « emplois jeunes », EDF expérimente la création de « guides de rivières », qui ont la charge d'inventer un nouveau métier, associant la surveillance des sites et l'accompagnement de sorties de plein air.

Ces échanges nous ont démontré la capacité et la volonté d'EDF à faire évoluer ses procédures et sa prise en compte des risques d'exploitation au plan local.

Concertation et actions de prévention sous l'égide de la Préfecture : la sécurité des zones situées à l'aval des barrages et ouvrages hydrauliques

« DRAC 1995 - Enfance et Prévention » et EDF ont demandé à la Préfecture de l'Isère la mise en place d'une concertation plus large avec tous les acteurs concernés. Les réunions associent « DRAC 1995 », EDF, les maires des communes concernées par les actions, des usagers (pêcheurs, kayakistes, chasseurs...), et de nombreux représentants de l'Etat : services de secours (pompiers, gendarmes, CRS...), services territoriaux et de l'équipement (Direction Départementale de l'Équipement, parc régionaux...), inspection d'académie, Jeunesse et Sports, etc. La présidence est assurée par le Sous-préfet, Directeur de Cabinet, qui coordonne également tous les aspects réglementaires.

Les réunions, qui se sont poursuivies activement du printemps 1999 à la fin 2002, présentent un double objectif :

- 1) développer des actions concrètes de prévention pour une meilleure sécurisation des sites dont l'accès est actuellement réglementé ;
- 2) faire évoluer les interdictions d'accès en fonction des progrès constatés (maîtrise de l'exploitation hydroélectrique, prévention et signalisation des risques).

Des groupes de travail ont été constitués depuis l'été 1999. Ils ont mené des actions de communication sur le site du Furon (petit torrent reliant le plateau du Vercors à la banlieue grenobloise), en direction des vacanciers et des promeneurs : distribution d'un « guide de bonne conduite », mise au point d'une signalétique d'information, action pédagogique à travers un spectacle de cirque, présence d'un saisonnier EDF et de deux gardes verts de la Mairie de Sassenage.

En 2000, un système d'alerte (sirènes) a été mis en place par EDF dans la vallée du Vénéon. Une réflexion est en cours pour permettre sa diffusion sur d'autres sites similaires. La présence de saisonniers EDF pour rencontrer et informer le public a par ailleurs été généralisée à d'autres sites.

Deux nouveaux groupes de travail ont été constitués au printemps 2000 :

- un groupe « Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication » élabore un site web sur les zones interdites d'accès et sur les conseils de prévention et de prudence. Le site est déjà fonctionnel, voir sous « <http://www.isere.pref.gouv.fr/risques/> » ;

- un groupe « Extension Prospective » prépare de nouvelles actions et établit un lien avec d'autres lieux de concertation. Il prend notamment connaissance du schéma directeur d'aménagement de l'agglomération grenobloise sur les questions relatives aux risques hydrauliques.

La validation des procédures d'exploitation et de prévention a permis une réduction significative des périmètres d'interdictions d'accès dont le respect devenait problématique. La mise au point d'une procédure active sûre combinant messages vocaux et passage de véhicules spécialisés laisse même entrevoir une réouverture

d'accès sur le site du Drac. On peut également espérer que la pratique de concertations multilatérales aide à résoudre les conflits d'intérêt inévitables autour de l'accès et de l'exploitation des rivières.

Les préoccupations de la FENVAC sur l'évolution du secteur électrique

Le secteur de la production électrique connaît actuellement un bouleversement avec la fin du monopole d'EDF et le développement de la concurrence, et les renouvellements des concessions des aménagements hydroélectriques sont désormais susceptibles d'être soumis à la concurrence. Déjà, des parcs importants de centrales hydrauliques, celles de la Compagnie Nationale du Rhône et de la SNCF sont contrôlés par un opérateur privé.

La FENVAC craint que ce développement de la concurrence se traduise par une compression exagérée des coûts d'exploitation, au détriment du financement à long terme des mesures de sûreté et de prévention. La multiplicité des exploitants compliquera également au niveau national la prise en charge de la sécurisation des zones sous influence, en particulier dans le domaine de la production hydraulique.

Ces préoccupations font l'objet d'échanges avec EDF, mais la FENVAC demande que des normes de sûreté alignées sur les meilleures procédures existantes soient imposées à tous les producteurs, que l'indicateur de Sûreté Hydraulique soit généralisé pour tous les exploitants et que son analyse soit confiée à une structure indépendante. Enfin, la FENVAC demande que ces évolutions soient prises en compte dans les directives européennes.

Conclusion

La fréquentation accrue des rivières et les attentes des utilisateurs de l'eau auraient certainement conduit EDF à intensifier ses actions dans le domaine de la sécurité des tiers. Mais la coopération entre EDF et la FENVAC a été un facteur déterminant. D'une part, les solutions proposées ont pu être évaluées et adaptées pour gagner en efficacité. D'autre part, l'implication de la FENVAC a permis de donner de la crédibilité à la démarche vis à vis d'interlocuteurs externes et ainsi d'entraîner l'adhésion d'autres acteurs, dont les pouvoirs publics, dans le développement et la mise en œuvre de dispositions nouvelles. Les résultats obtenus font de la démarche engagée par EDF un modèle qui fait référence, y compris hors de France.

Mais bien entendu, il serait prétentieux de dire que toutes les questions sont réglées. La sûreté hydraulique et la sécurité des tiers sont des préoccupations de tous les instants qui nécessitent modestie et persévérance, vigilance et implication personnelle pour tous les exploitants. EDF poursuit l'amélioration de sa démarche en utilisant en parallèle information du public dans un souci de prévention, amélioration de la sécurité de fonctionnement des installations, et sensibilisation permanente du personnel pour enraciner la « culture de sûreté ».



La régularisation du bassin de la Seine

The regulation of the Seine River Basin

Jean-Louis RIZZOLI

Institution interdépartementale des barrages-réservoirs
du bassin de la Seine
8, rue Villiot, 75012 – Paris
Tel. 01.44.75.29.12
Fax. 01.44.75.29.30
E.mail : jeanlouis.rizzoli@iibrbs.fr

Résumé

Malgré l'action des Grands Lacs de Seine, la région parisienne reste vulnérable aux grandes crues. C'est pourquoi, dans le cadre de ses missions, présentées dans cet exposé, l'Institution interdépartementale des barrages-réservoirs du bassin de la Seine s'est portée maître d'ouvrage des études d'évaluation des risques liées aux crues et de préfaisabilité technique d'ouvrages, permettant de répondre aux préoccupations des responsables publics, des populations et des représentants des activités économiques. La démarche de l'Institution se situe dans un cadre de « prévention-protection-information ».

Abstract

In spite of the attenuating function of the great lakes, the Paris area remains vulnerable to damage in case of major flood. For this reason, the IIBR – the Interdepartmental Institution for the Dams and Reservoirs of the Seine River Basin (Institution Interdepartmentale des Barrages-Reservoirs) as part of its mission described in this presentation, has become a Prime Contractor for risk evaluation studies. These studies will investigate the risks involved when rivers are in flood and will test the technical feasibility of potential future construction work, thus addressing the concerns of local government authorities, residents and representatives of the economic sector. The IIBR's approach operates within a broader "prevention-protection-information" framework.

Mots clés : Gestion des crues, Evaluation des risques, Protection contre les crues, Information du public.

Keywords : Flood Management, Risk Evaluation, Flood Protection, Information to the Public.

1. Les Grands Lacs de Seine

1.1 La régularisation du bassin de la Seine

Le climat océanique tempéré dont bénéficie le bassin de la Seine, son relief peu accentué et l'importance des affleurements perméables le constituant, contribuent à faire de la Seine le plus tranquille des grands fleuves français : son débit à Paris va de 25 m³/s lors de étés les plus secs à 2 500 m³/s pour la plus grande crue connue de 1910. Ce bassin se caractérise cependant par la présence sur ses rives de l'agglomération parisienne gigantesque par rapport à la taille de son bassin versant. Ainsi le développement économique de Paris et de sa région a très tôt rendu nécessaire la régularisation des principales rivières du bassin de la Seine.

Cette régularisation s'effectue au moyen d'ouvrages initiés à la suite des grandes inondations de 1910 et 1924 et de la sécheresse de 1921 qui avait rappelé la faiblesse de la ressource en eau face à l'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne.

Ils sont gérés par l'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine, également appelée « Les Grands Lacs de Seine ». Cet établissement public administratif qui regroupe les départements de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne a été créée en 1969 à la suite de la réforme administrative de la région parisienne, afin de poursuivre, pour son territoire, la double mission de l'ex-département de la Seine :

- diminuer les effets des crues de la Seine et de ses principaux affluents ;
- assurer des niveaux d'étiage pour l'alimentation régulière en eau de la région parisienne et pour maintenir les équilibres écologiques de ses rivières.

L'Institution a ainsi pour vocation de conduire une réflexion permanente sur la réduction des risques liés à ses missions par notamment l'amélioration de la gestion de ses ouvrages existants ainsi que la construction de nouveaux aménagements.

1.2 Le potentiel de l'Institution

L'Institution gère les grands lacs-réservoirs établis dans la vallée de l'Yonne et en dérivation des rivières Seine, Marne et Aube, localisés sur des terrains imperméables tels le massif granitique du Morvan et les argiles du Gault de la Champagne humide (fig 1).

❖ Le lac-réservoir de Pannecière-Chaumard

est un ouvrage en béton à voûtes multiples, établi dans la haute vallée de l'Yonne. Sa capacité est de 80 millions de m³, et le bassin versant contrôlé est de 220 km². Cet ouvrage a été mis en service en 1950.

❖ **Le lac-réservoir « Seine » (ou lac d'Orient)**

constitué de digues en terre, est établi en dérivation de la Seine. Sa capacité est de 205 millions de m³, le bassin versant contrôlé est de 2400 km². Le canal d'amenée est susceptible de dériver 180 m³/s, alors que le plus fort débit connu depuis 1888 est de l'ordre de 350 m³/s à Troyes. Sa mise en service est intervenue en 1966.

❖ Le lac-réservoir « Marne » (ou lac du Der-Chantecoq)

délimité aussi par des digues en terre, est établi en dérivation de la Marne. Sa capacité est de 350 millions de m³, le bassin versant contrôlé est de 2 900 km². Les ouvrages d'amenée peuvent dériver jusqu'à 400 m³/s, tandis que le plus fort débit observé est un peu supérieur à 500 m³/s. Cet ouvrage a été mis en service en 1974.

❖ Le lac-réservoir « Aube » (ou lac Amance et lac du Temple)

constitué par deux digues en terre, implanté comme les deux précédents en Champagne humide, en dérivation de l'Aube, a une capacité de 170 millions de m³ et le bassin versant contrôlé est de 1 650 km². Il permet de dériver 135 m³/s, soit jusqu'au 2/3 du débit maximal connu à la prise d'eau en Aube. Sa mise en service a commencé en 1989 et sa première mise en eau complète a été réalisée en 1991.

Ainsi avec ses quatre ouvrages, l'Institution peut, en amont du bassin, disposer d'un stock maximal d'environ 830 hm³ pour faire face à ses missions. Le lac Marne d'une part, les lacs Seine, Aube et Pannecière d'autre part, ont une influence sur chacun des axes, respectivement la Marne et la Seine en amont de Paris. De plus, chacun de ces lacs influence le débit de la Seine en aval de sa confluence avec la Marne et principalement jusqu'à la confluence Seine-Oise.

Ces aménagements sont donc des ouvrages de bassin, qui font aussi que l'Institution est un établissement public dont l'action est sensible sur un territoire bien plus vaste que celui de sa composition administrative.

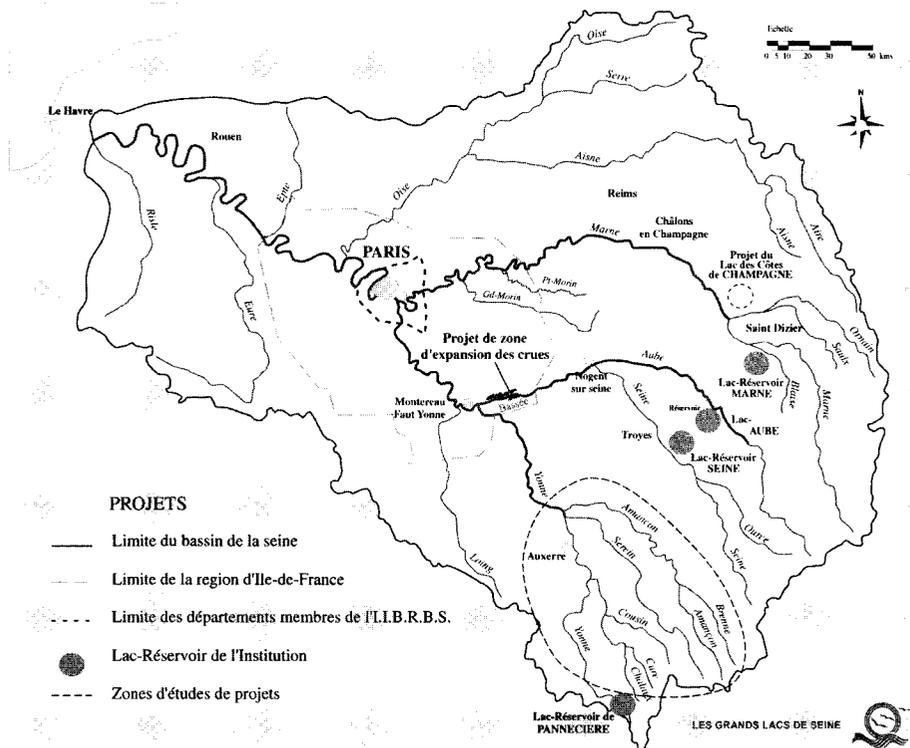


Figure 1 - L'aménagement du bassin de la Seine

2. Les lacs-réservoirs face au risque crue en région parisienne

2.1 La protection contre les crues

Les crues du bassin de la Seine en amont de Paris sont lentes, répétitives (généralement de décembre à mars) et relativement prévisibles grâce à leur décalage important par rapport à l'évènement pluviométrique qui en est l'origine.

La prévision est donc un outil indispensable pour lutter contre les inondations : il ne devrait théoriquement pas y avoir, en dehors d'accidents, de pertes humaines à redouter. Ce type d'inondation ne provoquerait que des dommages matériels comme cela a pu être vérifié en 1910. La réduction de ces dommages passe alors par des mesures de prévention et des mesures de protection.

La protection contre les crues en région parisienne résulte de la présence de grandes zones naturelles d'expansion de crue à l'amont (Bassée, Marne moyenne) et de la synergie entre l'action des Grands Lacs de Seine et la présence de protections locales.

Si les Grands Lacs de Seine ont une contribution reconnue par tous, ils ne contrôlent que 17 % du bassin versant de la Seine à sa confluence avec la Marne, et le degré de protection qu'ils apportent reste partiel et sélectif du fait notamment de l'absence de contrôle des apports en provenance de l'Yonne.

De même les protections locales, calées à des niveaux variables en fonction des vallées et des maîtres d'ouvrage concernés, peuvent avoir été limitées par des problèmes d'environnement ou de stabilité.

La région parisienne reste donc vulnérable aux grandes crues qui ne pourront que resurgir un jour et sur lesquelles une protection absolue est impossible (fig 2).

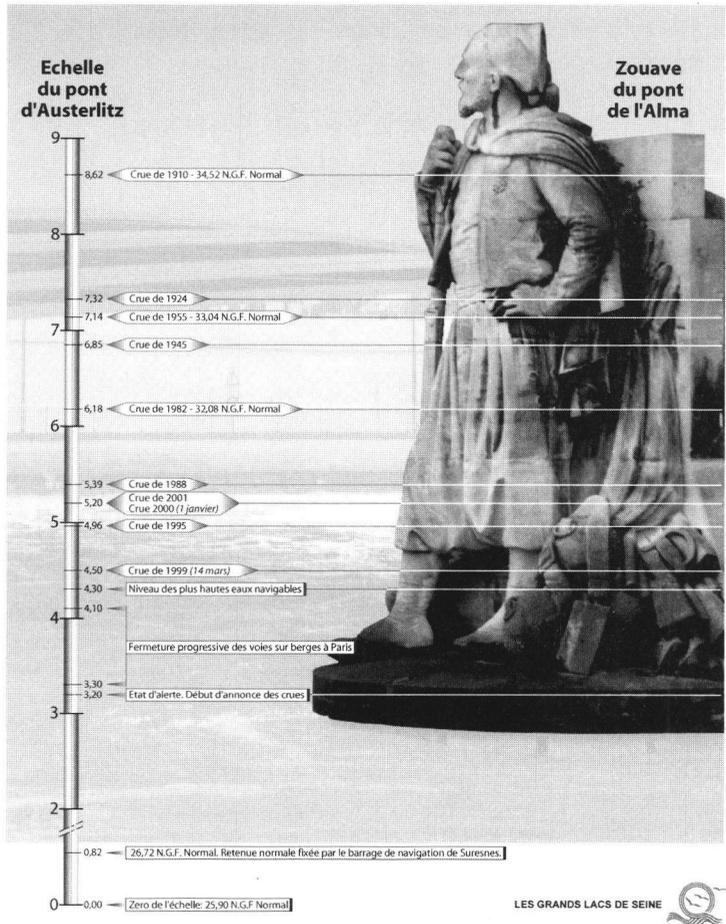


Figure 2 - Le niveau des plus hautes eaux de la Seine à Paris

2. 2 L'étude des enjeux socio-économiques des crues

Afin d'apprécier l'intérêt d'éventuels nouveaux investissements de protection contre les crues, l'Institution s'est portée maître d'ouvrage de vastes études, cofinancées par l'Agence de l'Eau, la Région Ile-de-France et le Ministère de l'Environnement, relatives à l'évaluation des enjeux socio-économiques des crues en région Ile-de-France.

Ces études novatrices qui se sont déroulées de 1990 à 1998 ont permis de se faire une idée assez précise des difficultés humaines, économiques et sociales qui se présenteraient en cas d'une grande crue débordante, les inondations par remontées de nappes n'ayant pas été étudiées. Elles ont permis ainsi d'évaluer les zones encore vulnérables pour différents niveaux de crues, les dommages correspondants et l'efficacité hydraulique et économique des ouvrages de protection existants ou projetés. Les principaux résultants sont les suivants :

- Une crue atteignant les mêmes niveaux que 1910 affecterait :

- 880 000 habitants et 170 000 entreprises ;
- 70% du métro et 50% du trafic RER pendant 30 à 50 jours ;
- plus de 200 000 abonnés pour l'électricité ;
- plus d'1 million d'abonnés pour le téléphone ;
- près de 100 000 abonnés pour le gaz ;
- 5 usines de traitement des ordures ménagères ;
- 5 centres de production de chauffage urbain ;
- 50% de la production d'eau potable.

- Ces études ont permis d'estimer notamment :

- les dommages directs et indirects à l'habitat, aux activités et aux équipements (hôpitaux, écoles, musées...);
- les désordres et dommages aux principaux réseaux tels que RATP, SNCF, EDF, GDF, Télécom, AEP...

Il en ressort que les plus hauts niveaux atteints pendant la crue de 1910 engendreraient aujourd'hui 12 milliards d'euros de dommages, chiffre largement sous estimé en raison de la difficulté d'appréhender au cours de cette étude le coût des dommages liés aux réseaux. Les opérateurs concernés conscients maintenant de la gravité du problème affinent ces chiffres tout en travaillant à prendre les mesures nécessaires pour les réduire.

L'impact des lacs-réservoirs serait de 60 cm sur la ligne d'eau à Paris pour une telle crue, correspondant à environ 4 milliards d'euros de dommages évités en région Ile-de-France : si l'impact hydraulique peut paraître faible, il n'en n'est pas de même pour l'impact économique.

- Compte tenu des travaux relatifs à l'amélioration des écoulements de la Seine, immédiatement après la crue de 1910, le débit centennal de 1910 donnerait une ligne d'eau 30 à 50 cm plus basse dans Paris, conduisant à des dommages estimés en Région Ile-de-France à près de 9 milliards d'euros. L'impact des lacs-réservoirs réduirait de moitié ces dommages : dans les conditions actuelles d'aménagement, une crue ayant le même débit que celui de 1910 provoquerait donc 4,5 milliards d'euros de dommages.

- Pour une crue trentennale du type de 1955, les dommages sans les lacs-réservoirs sont estimés à 3 milliards d'euros, ramenés à 1,1 milliard d'euros grâce à leur action.

- Ces études ont également souligné que les dommages importants apparaissaient en moyenne tous les 40 ans en l'absence des lacs-réservoirs et tous les 70 ans grâce à leur action, cela dans la zone centrale dense de la région Ile-de-France.

2. 3 Conclusion

Ces études ont permis d'élaborer un outil (hydrologique, hydraulique, et économique) permettant à l'échelle de la Région Ile-de-France de définir des objectifs cohérents de protection contre les crues et avoir une vision globale dans la mise en œuvre de moyens capables de les atténuer. C'est donc un outil d'aide à la programmation d'aménagements à l'échelle régionale.

Par ailleurs, ces résultats mettent en lumière notamment les deux points suivants :

- le coût d'une crue de même ligne d'eau que 1910 représenterait aujourd'hui près de 10 fois les estimations réactualisées des dommages que nous connaissons de cette catastrophe, traduisant ainsi l'augmentation importante des enjeux dans les vallées en région parisienne.

Toute protection (actuelle ou supplémentaire) doit donc avoir comme seul objectif la protection de l'existant et non pas être le prétexte à une urbanisation croissante augmentant la vulnérabilité de la région. Il est donc important de souligner l'indispensable réalisation d'un volet « prévention » (PPRI, plan de secours, information préventive ...) en parallèle du volet « protection ».

- Les dommages importants reviendraient en moyenne tous les 100 ans si on réalise les projets de l'Institution décrits plus loin.

Les ouvrages bénéfiques de l'Institution peuvent aussi avoir un effet pervers en donnant l'illusion d'une certaine sécurité source de dommages supplémentaires en cas de fortes crues. L'information, en parallèle du volet protection, est nécessaire pour reconquérir la culture de l'inondation des riverains.

C'est pourquoi la démarche de l'Institution ne peut que se situer dans un cadre de prévision - prévention - protection - information pour faire face aux crues, en liaison avec l'ensemble des acteurs concernés par ce phénomène naturel.

3. Les lacs-réservoirs face au risque étiage

Le développement de l'agglomération parisienne a été favorisé par des ressources en eau relativement importantes qui découlent, outre de la présence de nappes aquifères, de la confluence de trois grandes rivières (Seine, Marne, Oise).

Cependant, compte-tenu de l'importance des besoins, ces ressources peuvent s'avérer limitées en année très sèche, pour des raisons quantitatives et/ou qualitatives des eaux de rivière.

En effet, si sous le pont Mirabeau, la Seine est toujours présente, les barrages de navigation maintenant son plan d'eau, cette rivière coule-t-elle toujours ? Les franciliens ne savent peut-être pas que dans le passé, la Marne et la Seine avaient quelquefois pu se traverser à pied, et cela notamment au 19^{ème} siècle (photo 1).



Photo 1 - Un été 42 à Paris (photo S.N.S)

Dans ces périodes de très faibles débits, comment serait alors assurée l'alimentation en eau potable des 70 % des 9 millions d'habitants de la zone la plus dense de la région parisienne dont l'AEP s'effectue à partir de l'eau de rivière ? Comment s'effectuerait l'assainissement francilien et quel serait son impact sur les écosystèmes ? Que dire de la navigation et des activités en général ? etc...

Dans notre bassin, si les sécheresses frappent moins les esprits que les inondations, c'est peut être que le soutien d'étiage, souvent oublié, effectué par les ouvrages de l'Institution, est relativement efficace. En effet, les lâchures moyennes cumulées à partir des 4 lacs peuvent atteindre 70 m³/s. Lors de sécheresses comme on a pu le constater pendant celles de 1989-1993, les lâchures représentent une importante fraction du débit de la Seine et de la Marne (fig 3).

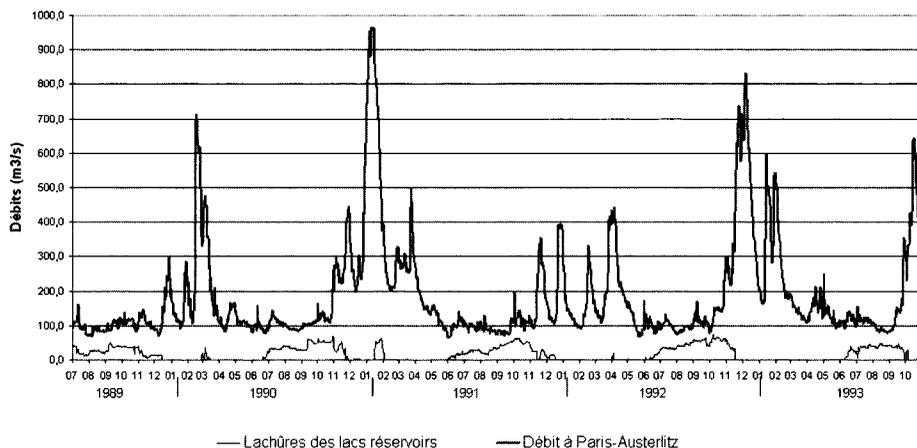


Figure 3 – Débit d'étiage de la Seine à Paris

Ce soutien d'étiage, outre l'augmentation du débit permet d'améliorer la qualité des eaux et favorise la vie aquatique dans les rivières concernées.

Des études menées avec l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, au milieu des années 90, il ressort que globalement l'insuffisance de la ressource proviendrait aujourd'hui plus d'une demande qualitative que de besoins quantitatifs et que c'est la Marne qui reste la rivière la plus fragile du bassin de la Seine en amont de Paris. Par ailleurs au niveau AEP, une certaine sécurité est atteinte grâce aux lacs-réservoirs, à l'amélioration des filières de traitement et à l'interconnexion des réseaux. Les efforts à court et moyen termes porteront donc sur l'amélioration de la qualité des eaux même si l'Institution a étudié pour les générations futures un nouvel ouvrage permettant d'amplifier et de sécuriser la régularisation de la Marne.

4. Les lacs-réservoirs et le développement local

Les emprises des Grands Lacs de Seine représentent au total 10 120 hectares de plans d'eau et 1650 hectares de rivages et bordures d'ouvrages. La mise en eau de ces vastes plans d'eau a contribué à créer des biotopes d'une grande richesse, aussi bien sur le plan faunistique que floristique, et a transformé cette région en véritable carrefour de migration où s'arrêtent et séjournent plus de 160 espèces d'oiseaux.

De plus, l'étendue des plans d'eau créés a permis, en Champagne notamment, le développement d'activités touristiques, culturelles et de loisirs dont la gestion a été confiée par l'Institution aux collectivités territoriales riveraines des lacs et qui attirent chaque année plus d'un million et demi de visiteurs.

Ces ouvrages dont la construction s'est échelonnée sur un demi-siècle, de par le développement local qu'ils ont ainsi créé, contribuent à l'aménagement du territoire. En Champagne, région qui a pris de plein fouet les restructurations industrielles, l'appropriation des potentialités de ces lacs par les acteurs locaux ne s'est cependant faite que petit à petit. Il est vrai que les premiers ouvrages (Pannecière, Seine) ont été impulsés dans l'urgence et imposés aux populations locales sans grande négociation : c'est l'intérêt général qui a prévalu. Pour les suivants, on est passé d'une décision imposée à une décision plus concertée (meilleure indemnisation, mesures compensatoires).

Aujourd'hui, les anciens opposants reconnaissent la réussite de ces aménagements et les cicatrices s'estompent, les jeunes générations vivant avec les lacs. Des projets de développement local se font de plus en plus jour et un partenariat entre l'Institution et ces collectivités locales se met en place pour tendre vers un nouveau cadre de vie de qualité.

Par ailleurs les enseignements du passé ont permis de contribuer à la définition d'une démarche à mettre en œuvre pour les futurs projets de l'Institution.

5. Les projets de l'Institution

Ainsi, en aval des Grands Lacs de Seine, la protection contre les crues est mieux assurée et les besoins actuels en eau sont satisfaits.

Cependant, nul ne peut prétendre que nos régions soient à l'abri du retour d'événements catastrophiques tels que ceux de la crue de 1910. C'est pourquoi, dans le cadre de ses missions, l'Institution s'est engagée, en parallèle des études destinées à mesurer les risques encore encourus, à rechercher les moyens susceptibles de répondre aux exigences du futur.

Aussi pour ce qui est de l'augmentation du niveau de protection de la région parisienne face aux crues, l'Institution conduit des études relatives à la faisabilité de nouveaux ouvrages comme le lac des Côtes de Champagne dans le bassin de la Marne et surtout l'aménagement de la zone d'expansion des crues dites de la Bassée aval en Seine et Marne, le long de la Seine. Ce dernier projet, prioritaire pour l'Institution, permettrait de réduire les dommages importants liés aux pointes de crues de l'Yonne (fig 1).

5.1 La démarche

Ainsi, pour mieux protéger les secteurs vulnérables de la région parisienne situés à l'aval, des actions relativement lourdes sont à prévoir dans le bassin amont. Ces aménagements s'inscrivent donc dans une dynamique du type « protection de l'aval – valorisation de l'amont », solidarité qui doit être de nature à renforcer la cohérence de bassin. La démarche de l'Institution qui en découle est donc schématiquement la suivante :

- Il convient d'intégrer le projet hydraulique au sein d'un programme d'aménagement du territoire souhaité par les acteurs locaux concernés. C'est donc une concertation très poussée la plus en amont possible du processus, qui permettra le développement du projet global, en toute transparence, l'émergence des projets de chacun et l'expression précise des attentes.

Pour nos projets, la concertation qui dure environ 3 à 4 ans, se déroule dans le cadre de groupes de travail animés par des élus locaux, et d'expositions permettant d'aller à la rencontre de tous les habitants et actifs du territoire.

- Il convient de montrer aux populations amont que l'aval fait aussi des efforts sur son territoire. Dans ce cadre à l'échelle du bassin, une réflexion est en cours pour que notre Institution élargisse un peu ses missions en n'agissant pas uniquement sur l'aléa hydraulique mais en coordonnant aussi un programme d'actions en vue de réduire la vulnérabilité des biens et activités exposés aux risques en région Ile-de-France. Cette volonté de prendre ces problèmes dans leur globalité a toujours été affichée par notre Institution en participant avec l'Etat et les communes à la cartographie des risques inondations, à l'information préventive, à la réflexion sur les PPRI et à la large diffusion de nos études qui ont notamment permis à divers services publics d'établir des plans de prévention et de protection.

5.2 La Bassée

L'objectif est de concevoir dans la concertation un projet permettant de contribuer au développement local de la Bassée aval, tout en intégrant le volet hydraulique souhaité par l'Institution pour lutter contre les inondations en aval de la confluence Seine-Yonne.

Le principe est de retenir de l'eau de Seine dans le lit majeur de la Bassée entre Bray et Montereau au moment du passage de la pointe de crue de l'Yonne. Le creux de débit ainsi créé sur la Seine par cette retenue d'eau, permet de diminuer le débit de pointe à Montereau. Les possibilités de stockage pour un tel aménagement sont situées dans la partie de la Bassée en aval de Bray-sur-Seine, du fait que, dans ce secteur, le lit majeur n'est pratiquement plus inondable, la Seine ayant été canalisée au début des années 80. Les stockages seraient

constitués de plusieurs espaces de bassins délimités par des digues paysagées et alimentés par pompage en Seine, la vidange étant effectuée par gravité.

Cet aménagement permettrait d'abaisser de 20 à 30 cm le niveau de la Seine en région parisienne lors d'une crue comparable à celle de 1910. Il pourrait également permettre une revitalisation durable des milieux alluviaux et plus généralement être un projet global fédérateur pour tous les usages et intérêts multiples que possède la Bassée.

Ce projet, estimé à environ 250 millions d'euros, permettrait de réduire de 600 millions d'euros supplémentaires le coût d'une crue type 1910.

5. 3 Le Lac des Côtes de Champagne

Il permettrait de poursuivre l'équipement du bassin amont de la Marne par le contrôle du bassin versant de la Saulx, affluent de la Marne.

Les principes généraux de construction et d'aspect de ce projet seraient identiques à ceux des lacs-réservoirs Seine, Marne et Aube, à savoir : un ouvrage en dérivation dont les digues en terre ne barrent pas la vallée principale.

Le Lac des Côtes de Champagne est le dernier grand site potentiel d'implantation d'un lac-réservoir du bassin de la Seine en Champagne. Ce projet a été élaboré dans le cadre d'une concertation locale avec le double objectif d'améliorer les ressources en eau et renforcer les capacités d'écrêtement des crues.

Cet aménagement permettrait de diminuer la hauteur des inondations d'environ 30 cm le long de la Marne en région parisienne et aurait un impact bénéfique le long de la Seine en aval de la confluence avec la Marne lors d'une crue comparable à celle de 1910.

Ralentissement dynamique des crues, le cas du bassin de l'Oudon

Dynamic flood retention, the case of Oudon river

Arnaud de Bonviller (*), Michel Lino ()**

(*) ISL, 1 avenue du Bois l'Abbé
49070 Beaucozé
Tél : 02 41 36 01 77
Fax : 02 41 36 10 55
E mail : adb@isl-ingenierie.fr

(**) ISL, 75 boulevard Mac Donald,
75019 Paris
Tel. 01 55 26 99 99
Fax 01 40 34 63 36
E.mail : mli@isl-ingenierie.fr

Résumé

Le ralentissement dynamique consiste à retenir temporairement les eaux partout où cela est possible et en particulier sur le haut bassin versant. Le choix du ralentissement dynamique comme stratégie d'ensemble sur le bassin versant de l'Oudon a résulté de facteurs géographiques et socio-économiques favorables. Le parti retenu intègre gestion optimisée des plans d'eau existants (creux préventifs) et zones de sur-stockage d'importance variable (10 000 à 600 000 m³) en profitant des remblais transversaux existants ou en en créant de nouveaux. Bien que simple au premier abord, la mise en œuvre d'une telle stratégie demande en réalité une analyse hydrologique et hydraulique approfondie, accompagnée d'un effort d'explication auprès de l'ensemble des acteurs. Le présent article expose le contexte, la méthode d'identification des sites de sur-stockage, l'effet du programme sur l'un des sous-bassins versants. L'expérience permet de tirer des enseignements sur l'intérêt, les contraintes et les limites d'une telle stratégie.

Abstract

The concept of dynamic flood retention consists in a temporary flood storage wherever it is possible, especially on the upper watershed. The option of dynamic slowing down as a global strategy for the river Oudon was chosen considering the geographical and socio-economical advantages of the watershed. The solutions recommended are : optimised water level management on existing ponds and flood impounding areas (10 000 to 600 000 m³) using existing embankment or creating new ones. Though this strategy seems easy to achieve, it requires detailed hydrological and hydraulic analysis as well as a wide negotiation with all the actors. This paper explains the context, the method for identifying the flood retaining sites and the result of a simulation on a part of the watershed. This experience allows to learn about the interest, the difficulties and the limits of this kind of strategy.

Mots-clés : Ralentissement dynamique, maîtrise des crues

Keywords : *Dynamic flood retention, flood management*

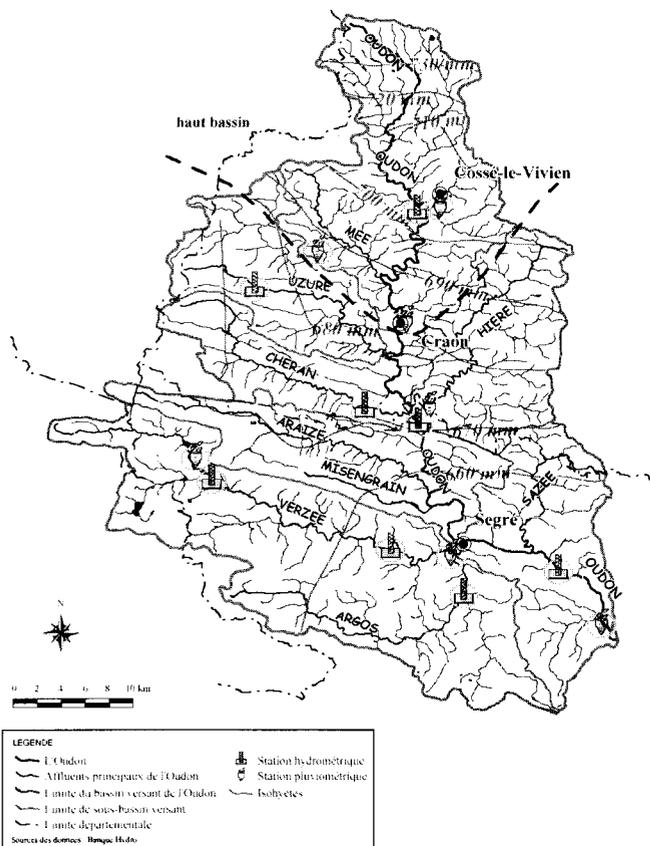
Présentation du bassin versant de l'Oudon

Situé en limite est du massif armoricain, le bassin de l'Oudon est essentiellement constitué de schistes et de grès dont la perméabilité est faible. L'infiltration étant limitée, les eaux de ruissellement ont creusé un ruisseau au fond de chaque talweg. Ainsi, plus de 800 km de cours d'eau pérennes drainent les 1480 km² du bassin. Ces eaux rejoignent le cours aval de la Mayenne.

Le ruissellement prépondérant et l'absence de nappes alluviales étendues sont à l'origine du régime très contrasté de la rivière pourtant sous influence océanique. Aux crues d'hiver, parfois violentes, succèdent en été des étiages sévères.

La topographie des lieux permet de séparer le bassin versant en deux grandes entités :

- un bassin versant amont, de forme allongée d'orientation nord/sud, à pente forte ;
- le bassin versant aval, marqué par la présence de 3 grands affluents orientés ouest/est, à pente modérée.



Caractéristiques hydrologiques

Origine des crues

Les crues les plus intenses se produisent de décembre à mars. Les crues sont toujours dues à l'alternance de pluies longues conduisant à la saturation des sols du bassin versant, suivies d'un ou plusieurs épisodes pluvieux avec des cumuls importants sur deux jours.

Les sous bassins ont des caractéristiques géométriques voisines et ont tendance à réagir simultanément pour des événements pluviométriques homogènes sur le bassin versant. Le temps de concentration des affluents est en effet faible par rapport à la durée des pluies générant des crues dommageables. Les crues généralisées des affluents se concentrent alors au droit de secteurs de confluence privilégiés :

- sur la commune de Châtelais avec les confluences de l'Oudon Mayennais, de l'Uzure, de l'Hière et du Chéran (soit la moitié du bassin versant) ;
- sur la commune de Segré avec la confluence de l'Oudon, de l'Araize, du Misengrain, de la Verzée et de l'Argos (soit près de 90 % du bassin versant).

Dans le cas où les cumuls atteints sur plusieurs semaines sont importants, une lame d'eau sur 2 jours de plus de 30 mm sur l'ensemble du bassin versant peut générer des crues dommageables.

Pluviométrie associée aux crues récentes

Les tableaux 1 et 2 présentent les caractéristiques pluviométriques et les volumes ruisselés lors des crues de 1995, 1996, 1999 sur le bassin.

Événement	État de saturation du bassin	Cumul intense pluviométrique à l'origine du déclenchement de la crue
janvier 1995	Cumul du mois de décembre de 90 mm période de retour 3 ans	3 cumuls supérieurs à 30 mm/48 h, plus forte valeur enregistrée sur 9 jours depuis 1928 (130 mm)
février 1996	Cumul du mois de février de 130 mm période de retour 20 ans	70 mm en 48 h, plus forte valeur enregistrée sur 2 jours en février depuis 1928
décembre 1999		40 mm en 48 h, plus forte valeur enregistrée depuis 1928 sur 4 jours consécutifs en hiver (80 mm)

Tableau 8 : pluviométrie associée aux crues récentes sur le bassin versant de l'Oudon

Crue	Volume à Chatelais	Volume à Andigné	Temps de montée de la crue à la station de Châtellais : durée que met la crue pour passer d'un débit de 25 m ³ /s au débit de pointe
1995	85 hm ³	160 hm ³	1 ^{er} pic : 24 heures
1996	20 hm ³	40 hm ³	24 heures
1999	40 hm ³	80 hm ³	24 heures
2001	22 hm ³	54 hm ³	30 heures

Tableau 9 : volumes mis en jeu et temps de montée du débit de la crue

Les dommages liés aux crues

Le bassin versant de l'Oudon a connu durant la période 1995-2001 une succession de crues dommageables : janvier 1995, février 1996, février 1997, décembre 1999 et janvier 2001.

Trois secteurs sont particulièrement touchés :

- Craon en amont du bassin versant (superficie : 300 km²) ;
- la partie aval de la Verzée (superficie à Segré : 400 km²) ;
- la partie aval de l'Oudon, en amont de la confluence avec la Verzée (superficie : 900 km²)

Environ 200 habitations sont touchées directement par les crues. Le coût moyen annuel direct est estimé à 0,3 million d'euros.

Les stratégies envisagées pour la lutte contre les inondations - définition des objectifs

Dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'Oudon, diverses stratégies de lutte contre les inondations ont été envisagées. Les voies explorées ont été les suivantes :

- réalisation de retenues temporaires sur les cours d'eau principaux,
- ralentissement par levées transversales sur l'Oudon,
- ralentissement des écoulements par sur-stockage dans le réseau secondaire,
- ralentissement des écoulements par sur-stockage dans les émissaires agricoles,
- utilisation des plans d'eau existants.

Deux critères ont permis de définir la stratégie :

- le critère économique, le coût d'investissement et d'exploitation devant être à la hauteur du gain obtenu,
- l'acceptation par la population des aménagements préconisés.

Les levées transversales sur l'Oudon

Des projets de ce type sont actuellement à l'étude sur les rivières de l'Huisne et de la Sarthe. Le programme sur l'Oise prévoit également ce type d'aménagement. Il s'agit de profiter des remblais en travers de la vallée (ou de nouveaux remblais)

pour sur-stocker l'eau. Le lit majeur de l'Oudon entre Craon et Angers est étroit. En amont de Craon, la pente de la rivière est forte (de 1% jusqu'à 4%). Dans le contexte de l'Oudon, la contrainte foncière est importante : les bâtiments des exploitations agricoles sont en général situés en bordure de zone inondable. En cas de surélévation des niveaux d'eau, ils peuvent donc être rapidement touchés. Par ailleurs, les hameaux ou bourgs se succèdent assez régulièrement le long de la vallée. Cette contrainte conduit à n'envisager que des stockages limités à l'emprise de la vallée elle-même et à écarter les grands ouvrages. L'efficacité testée sur certains sites a montré le peu d'intérêt de tels ouvrages. Cette stratégie générale aurait été par ailleurs mal comprise par la profession agricole, les dommages subis dans les zones urbaines étant reportés sur les zones bâties agricoles.

Les retenues temporaires sur le réseau principal

Quatre sites de retenue temporaire ont été identifiés en amont de la confluence avec l'Argos-Verzée. Ces barrages sont situés sur les affluents de l'Oudon. Une estimation des gains apportés a été faite à partir d'un modèle hydrologique et de modèles hydrauliques locaux.

Un seul site a été retenu. Il s'agit d'un ouvrage situé en amont de Craon. Cet ouvrage contrôle 25% du bassin versant de l'Oudon à Craon. Les autres sites, localisés entre Craon et Segré, n'ont pas été retenus pour les raisons suivantes :

- un rapport efficacité/coût défavorable – une protection contre des inondations de type février 1996 suppose un investissement de 12 millions d'euros – le gain n'est pas significatif pour une crue de type janvier 1995 ;
- une emprise de la zone sur-inondée qui englobe environ 25 bâtiments, peu acceptable du point de vue des acteurs au regard du gain obtenu.

Le ralentissement des écoulements par le réseau secondaire

Une cinquantaine de sites de stockage temporaire des crues sur les affluents de second ordre de l'Oudon a été identifiée (volume de stockage entre 10 000 et 100 000 m³). Cette stratégie a été retenue sur la partie aval du bassin versant compte tenu de la configuration des lieux : pente générale modérée, réseau en arête formé d'un chevelu secondaire dense drainant des bassins versants de taille modeste (la dizaine de km²), drainage des eaux par un réseau souvent rectifié conduisant à une inondation très réduite de la vallée, nombreux franchissements routiers. Des techniques simples de stockage y ont été préconisées. Deux cas de figure ont été considérés : digue désaffectée, remblai routier.

- Digue désaffectée : l'aménagement consiste en un renforcement de la digue et en l'implantation d'un nouvel ouvrage hydraulique de régulation (buse ou régulateur à flotteur selon le débit à contrôler) ; la sécurité est assurée par l'aménagement d'un déversoir de crue sur la crête de la digue ;
- Remblai routier : les aménagements sont identiques à ceux d'une digue désaffectée excepté en ce qui concerne le déversoir de sécurité ; les crues exceptionnelles sont évacuées par un déversoir situé juste à l'amont de la galerie existante sous le remblai.

Utilisation des plans d'eau existants

Les plans d'eau représentent une superficie cumulée de 400 hectares. 5 grands plans d'eau totalisent 200 hectares. Ces derniers sont utilisés pour des activités de loisirs. La réservation d'une tranche d'écrêtement sur la période novembre-mars permet de stocker un volume de 2 hm³.

Les émissaires agricoles

Dans le cadre de l'élaboration du SAGE, le débat sur l'effet des émissaires agricoles sur les crues dommageables a conduit à une simulation d'aménagements sur les 100 km d'émissaires présents sur le Segréen (partie aval du bassin versant). Une simulation de réducteurs de buse sur ces émissaires a montré que l'effet de l'aménagement était réduit sur ces crues compte tenu de la faible capacité de stockage du réseau.

Le parti retenu

Le parti d'aménagement a été retenu au regard des critères coût/efficacité et acceptation par la population. L'objectif du programme est la mise hors d'eau de 110 maisons par rapport à la situation actuelle pour une crue de type février 1996 (période de retour 20 à 25 ans). Il a été implicitement admis que pour des crues plus importantes en volume (janvier 1995, et dans une moindre mesure décembre 1999), le programme de sur-stockage aura des effets limités. Une analyse économique sommaire a montré qu'un objectif de protection contre les crues de type 1995 n'était pas envisageable au regard des dommages subis.

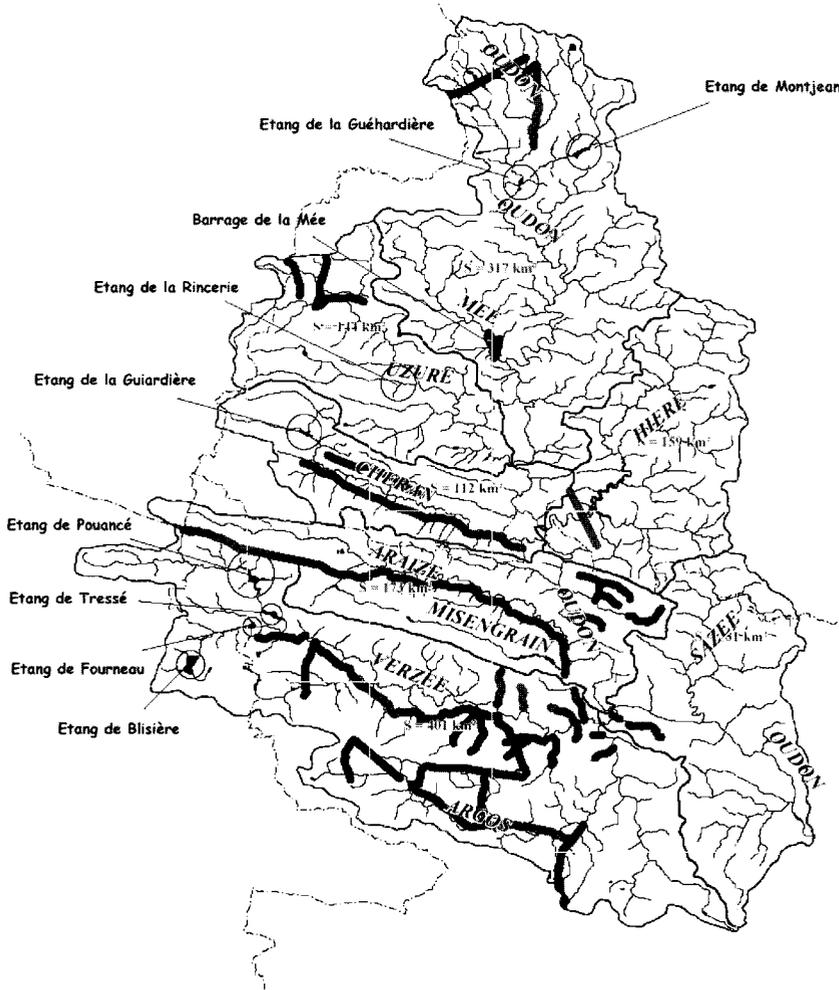
Le programme prévoit :

- sur l'ensemble du bassin versant, une gestion optimisée des plans d'eau existants (creux préventifs) et une modification des ouvrages hydrauliques d'évacuation ;
- sur le bassin amont, deux projets de sur-stockage, l'un obtenu par création d'un remblai d'une hauteur maximale égale à 7 mètres en travers de la vallée et permettant le sur-stockage de 600 000 m³, l'autre s'appuyant sur un remblai d'un étang existant, permettant un sur-stockage à peu près équivalent ;
- sur le bassin aval, la réalisation de zones de sur-stockage de faible importance (10 000 à 100 000 m³) en profitant des infrastructures existantes.

Le volume sur-stocké est de 6 hm³ pour un coût de 5 millions d'euros. Le programme général intègre par ailleurs des protections locales de zones particulièrement touchées (coût : 2 millions d'euros).

L'objectif ultime est de généraliser la réalisation de sur-stockage en amont des voies de circulation existantes. Dans une première phase, un ensemble de 16 sites a été retenu. Le concept d'aménagement dépend de l'importance du bassin versant contrôlé. Les critères guidant le choix de la solution technique sont les suivants :

- une efficacité pour les crues de type février 1996,
- un entretien minimal,
- une simplicité de gestion,
- une situation inchangée en cas de survenance d'une crue de printemps,
- la sécurité en cas de survenance d'une crue exceptionnelle.



Légende:

- Réduction des débits au débouché des émissaires agricoles
- Route traversant le réseau hydraulique principale - projet de ralentissement
- Route traversant le réseau hydraulique secondaire - projet de mini-stockage
- Tranche d'écrêtement affectée aux grands plans d'eau
- Stockage sur la Mée

Identification des sites de sur-stockage sur le bassin versant de la Verzée

L'identification des sites de sur-stockage sur le réseau secondaire passe par une recherche exhaustive, sur l'ensemble du bassin versant étudié. Les méthodes et outils mis en œuvre ont été les suivants (figure 1, page suivante) :

- analyse sous Système d'Information Géographique (identification des intersections entre routes et cours d'eau du chevelu des affluents de l'Oudon) ;
- enquêtes auprès des 45 communes du Syndicat ;
- enquêtes auprès des 6 délégués de sous-bassin ;
- recherche historique sur les cartes dites « Cassini » aux archives départementales.

Les résultats de ces recherches ont fait l'objet d'une vérification sur le terrain puis d'une série de tris sélectifs en fonction de trois critères principaux de préférence :

- bassin versant capté de taille minimum (critère non exclusif pour les sites proposés par la profession agricole) ;
- vulnérabilité des personnes et des biens dans le périmètre de surstockage (critère strictement appliqué) ;
- mode d'occupation des sols dans le périmètre de surstockage (les sites de prairie ont été préférés).

Parmi la trentaine de sites qui se sont dégagés de cette analyse, certains d'entre eux se distinguent par leur performance propre, évaluée selon deux principaux indicateurs (hauteur de retenue, volume stockable rapporté à la surface de bassin versant capté).

Outil de simulation hydrologique et hydraulique

Le modèle de simulation comprend :

- un modèle pluie-débit de type hydrogramme unitaire ;
- pour le réseau secondaire un modèle de propagation des hydrogrammes par la méthode de Muskingum ;
- pour l'Oudon, un modèle hydraulique de transfert.

Le modèle a été calé sur la crue de février 1996 et validé sur la crue de décembre 1999. Le calage a été recherché aux quatre stations hydrométriques : exutoire du bassin versant du Chéran, l'Oudon en amont de sa confluence avec la Verzée, la Verzée, l'Oudon aval. Les données d'entrée du modèle (débits de crue, pluies mesurées, volume de stockage ou débit de consigne des sites de surstockage) permettent alors d'estimer les réductions de débit dues au surstockage, notamment à Segré.

Historique de l'étude – année 2002

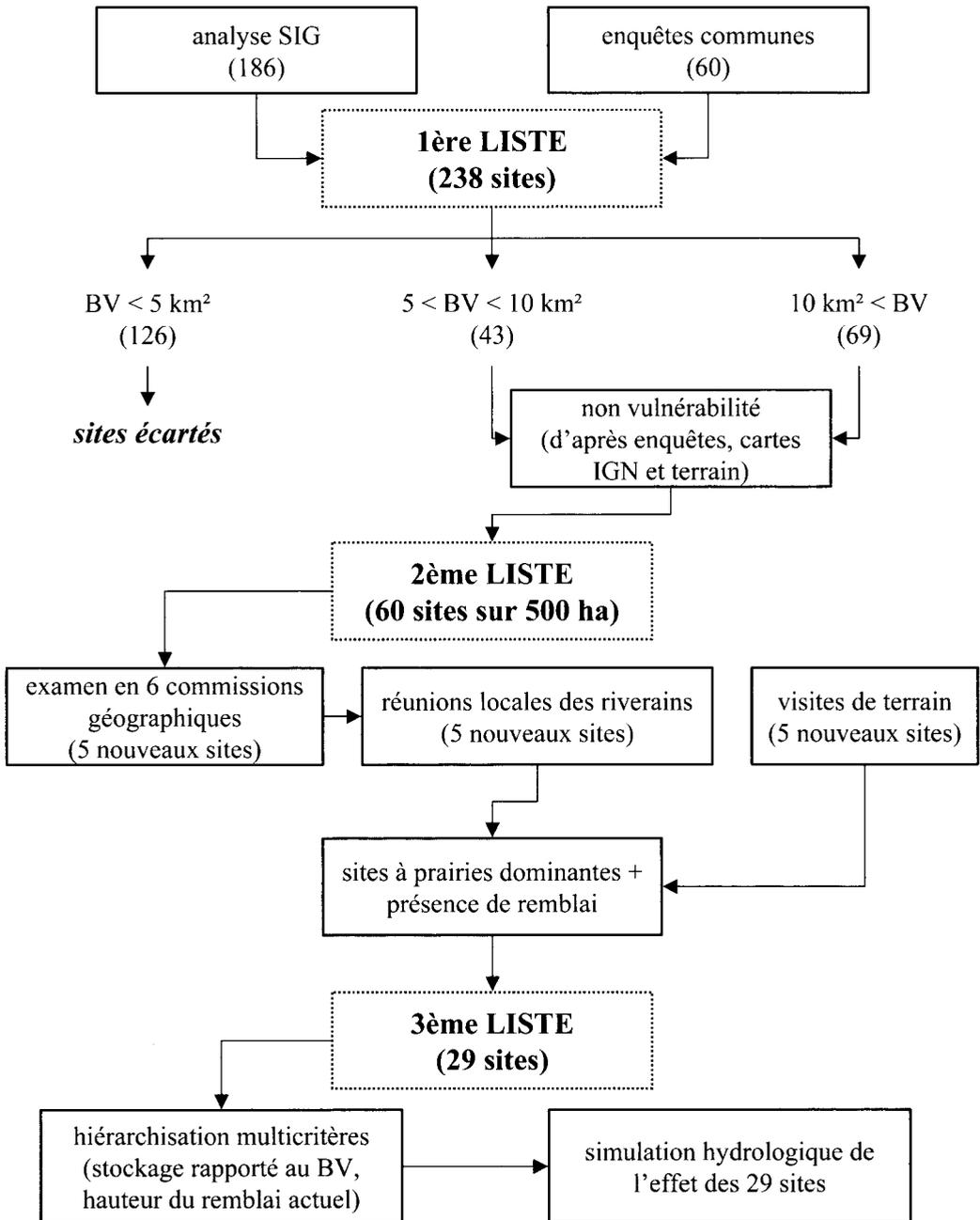


Figure 1 : Méthodologie d'identification des sites sur le bassin de la Verzée

Techniques mises en œuvre

Les techniques mises en œuvre dépendent des cas de figure et des volumes sur-stockés.

Dans le cas d'un remblai routier, l'évacuation des crues plus fortes que la crue de référence (février 1996 sur le bassin de l'Oudon) au-dessus de la chaussée n'est pas souhaitable, même sur une faible longueur. Les plus fortes crues sont donc évacuées par un déversoir implanté à l'amont de la route. Le déversoir proposé traverse le ruisseau puis se raccorde au remblai routier depuis chaque rive. Il est dimensionné pour la crue millénale (utilisation de la méthode du Gradex).

Dans le cas d'une digue désaffectée, un ouvrage de contrôle mis en charge à partir d'une crue annuelle est installé en travers du cours d'eau.

La gestion des ouvrages répond aux impératifs suivants :

- en hiver, transparence aux écoulements courants et écrêtement des crues ;
- au printemps et en été (période avril-novembre), non modification de la situation hydraulique.

La section d'écoulement est donc rétablie au printemps par l'ouverture d'un pertuis batardé.

Analyse de l'efficacité du programme

L'efficacité du programme est simulée à l'aide du modèle hydrologique. Une difficulté réside dans la prise en compte du stockage naturel de la vallée. Dans le cas du bassin versant de l'Oudon, plusieurs cas sont rencontrés :

- sur le réseau secondaire, le lit majeur n'est pas mobilisé pour une crue de type février 1996. La capacité du site est intégralement considérée dans le calcul du laminage ;
- sur le réseau des affluents, la simulation doit prendre en compte la capacité de stockage et l'effet éventuel des obstacles existants : ponts, rétrécissements. Un calage sur des laisses de crue est donc nécessaire (modèle hydraulique) ou à défaut une relation hauteur/débit à l'aval immédiat du site et un calcul simplifié du laminage.

Dans le contexte de l'Oudon, deux sous-bassins versants peuvent être analysés dans un premier temps de manière indépendante :

- le bassin versant de la Verzée ;
- le bassin versant de l'Oudon en amont de la confluence avec la Verzée.

Les enjeux se situent en amont de la confluence de ces deux bassins versants. La figure 2 présente les hydrogrammes avant et après aménagement des sites de sur-stockage réalisés sur le bassin versant de la Verzée.

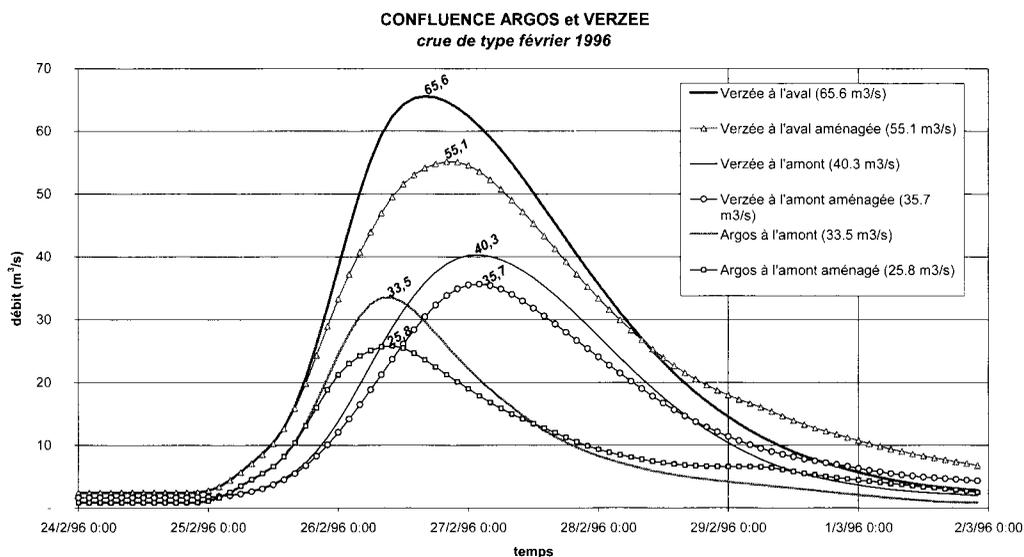


Figure 2 : hydrogrammes avant et après aménagement sur la Verzee et l'Oudon aval

La grande incertitude sur le nombre d'aménagements qui sera effectivement réalisé conduit à considérer divers scénarios. Les enquêtes auprès des propriétaires et exploitants permettent de hiérarchiser les sites du point de vue de la difficulté de mise en œuvre. Quatre scénarios ont été bâtis à partir de ce critère.

L'effet des aménagements à l'amont de la confluence avec la Verzee fait l'objet actuellement d'une analyse plus poussée. Les travaux en cours prévoient d'estimer en particulier le gain moyen annuel engendré par l'ensemble du programme.

Signalons par ailleurs qu'à l'échelle du bassin de la Mayenne, le programme n'a aucune incidence car l'événement de référence retenu pour le dimensionnement du programme (épisodes pluvieux courts), ne correspond pas à un événement de référence sur ce bassin.

Conclusion

Le programme de ralentissement dynamique réalisé sur le bassin versant de l'Oudon permet de tirer quelques enseignements.

L'idée du ralentissement dynamique est séduisante et est bien perçue par les acteurs locaux pour plusieurs raisons : la profession agricole y voit un moyen de répondre aux critiques formulées concernant l'influence de l'agriculture sur les crues dommageables, les inondés préfèrent cette stratégie à des solutions locales de type endiguement, les gestionnaires de plans d'eau, critiqués lors des crues, y

voient un moyen de partager la responsabilité et les choix de gestion en temps de crise.

Cette stratégie met en œuvre des techniques hydrauliques simples et permet de réduire et partager les contraintes d'exploitation liées aux aménagements ; son impact sur l'environnement est limité.

Une communication préalable auprès de l'ensemble des acteurs est nécessaire et demande une étude poussée de l'hydrologie du bassin versant. Trois idées ont fait leur chemin durant les 5 dernières années sur le bassin de l'Oudon :

- un programme de ralentissement dynamique ne permet pas de lutter contre les crues de longue durée et dépassant la crue de dimensionnement ;
- l'effet de l'agriculture sur les crues dommageables est faible et le programme de sur-stockage mobilise en réalité des terrains qui n'étaient pas par le passé mobilisés ou étaient mobilisés différemment ;
- le ralentissement dynamique doit être mené de manière équilibrée sur l'ensemble du bassin versant afin de respecter l'horloge des crues – sur l'Oudon, l'aménagement d'un site pilote retenu par les acteurs locaux a été reporté pour cette raison ;

Un programme de ralentissement dynamique reste très difficile à élaborer : la multiplicité des aménagements demande une étude hydrologique et hydraulique fine, la multiplicité des acteurs demande une concertation et un effort d'explication très importants.

Deux points sont mal perçus par les acteurs locaux : l'importance des études nécessaire au regard de la modestie des ouvrages réalisés, le coût des aménagements liées à la mise en sécurité des ouvrages (déversoirs) dont l'intérêt n'est pas toujours compris.

Le programme de ralentissement dynamique sur l'Oudon a été porté par les élus et la profession agricole. Ce double engagement a permis d'établir un protocole d'accord d'indemnisation des propriétaires et exploitants basé sur une indemnité forfaitaire pour l'acceptation du principe et une indemnité en fonction du sur-dommage occasionné lors des crues. Il n'en demeure pas moins que du chemin reste à parcourir afin que le principe se répande.

La question de l'augmentation de la décantation des matières en suspension, que ce soit sur les terrains agricoles ou dans les plans d'eau, est difficile à traiter. Cette question est posée pourtant régulièrement par les exploitants qui craignent une réduction de la qualité de l'herbage et un engorgement rapide des retenues destinés aux loisirs.

Présentation de solutions, par petits barrages en terre, pour la prévention des risques d'inondations sur des bassins semi-urbains.

Solutions for flood prevention on small semi-urban catchment areas, by means of small earth dams.

Alain Cassard,

DDAF, Subdivision de Saverne
r Maennolsheim - 67700 SAVERNE
Tel. 0388018630
Fax 0388018631
E-mail : alain.cassard@agriculture.gouv.fr

Jean B. Poulet , Abdelali Terfous, Pierre Regenass, Abdelah Ghenaim,

INSA Strasbourg,
24 bd de la Victoire 67084 Strasbourg Cedex
Tel. 0388144700
Fax 0388144799
E-mail : jean-bernard.poulet@insa-strasbourg.fr

Résumé

L'urbanisation et les pratiques culturelles contribuent à la multiplication des dysfonctionnements du ruissellement des eaux issues de petits bassins versants semi-urbains et génèrent des inondations qui menacent les biens et les personnes et obèrent le développement des collectivités. Dans ce contexte, des études appliquées à ce thème présentent des solutions alternatives basées sur des techniques simples d'aménagement hydraulique apportant une réponse économique et environnementale aux pratiques anthropiques maladroites.

Le travail rapporté ici présente trois cas différents d'aménagement intégrant divers aspects hydrauliques voire des aspects de dépollution, d'aménagement de loisirs, de circulation. L'analyse des ouvrages a été conçue en s'appuyant sur la démarche du développement durable. Ces ouvrages intéressants la sécurité publique sont conçus avec les mêmes soins que les petits barrages au regard des règles habituelles de dimensionnement afin que la gestion des crues ne se transforme pas en catastrophe en cas de rupture des digues.

Abstract

Urbanisation and cultural practices contribute to increase the malfunctioning of the streaming of waters coming from small semi-urban catchment area and generate floods which threaten the possessions and the persons and compromise the development of communities. In this context, studies applied to this subject, present alternative solutions based on simple techniques of hydraulic management representing an economic and environmental answer to the clumsy anthropological practices.

The work reported here presents three different cases, integrating various hydraulic aspects even aspects from depollution, leisure zone, circulation. The analysis was performed according to the sustainable development approach. These works interesting public safety

are designed with the same technical criteria used for small dams, so that the flood management is not transformed into catastrophe in the event of rupture of the dikes.

Mots-clés : Ecrêteur de crues, Inondations, Incidence, Loi sur l'eau, Développement durable, Digue déversante.

Keywords : *Dike, Floods, Incidence, Water law, Sustainable development.*

Introduction

Certaines agglomérations du Bas-Rhin subissent de plus en plus fréquemment des inondations liées au développement de leur urbanisation et à certaines pratiques agricoles.

Les solutions « tout tuyau » ou « canalisation du cours d'eau » ne sont plus aujourd'hui envisageables pour des raisons évidentes. Stocker les eaux de ruissellement le plus en amont possible est une réponse « environnementalement correcte » qui emporte l'adhésion des maîtres d'ouvrage.

Cette technique, consistant à créer des bassins de retenue, nécessite la construction de digues barrant le thalweg et d'ouvrages annexes (évacuateur de crues, pertuis de régulation) ; elle n'est malheureusement pas toujours bien maîtrisée par les bureaux d'études spécialisés en assainissement.

Il s'agit à proprement parler de petits barrages dont la problématique récurrente est :

- l'hydrologie de petits bassins versants ;
- le choix de la fréquence de la crue de projet ;
- la stabilité des fondations meubles ;
- les emprunts dans des sols fins sensibles à l'eau (Indice de plasticité > 30) et l'éventuel traitement de ces sols au ciment ou à la chaux ;
- la digue déversante avec talus aval renforcé par gabions ou géomembranes ;
- la fiabilité des pertuis ;
- la sécurité et la pérennité des ouvrages ;
- tout cela, pour un coût raisonnable.

L'élaboration de ces projets, même modestes, est longue. Les études préliminaires, l'avant-projet, les études d'incidence voir d'impact, l'élaboration de mesures compensatoires et la procédure « loi sur l'eau », conduisant à l'autorisation de construire ces ouvrages, peuvent s'échelonner sur plusieurs années.

Aménagement et développement durable

Les aménagements proposés dans le présent travail se sont appuyés sur une analyse reprenant les trois axes usuels du développement durable.

Le premier axe de réflexion permet, à partir de l'analyse fonctionnelle de définir l'importance relative des fonctions de l'ouvrage et les paramètres de ces fonctions.

Le deuxième axe permet de proposer une synthèse des divers aspects environnementaux de l'ouvrage aussi bien au niveau local de la parcelle, qu'au niveau de la commune et du bassin versant.

Le troisième aspect consiste à cerner à la fois les aspects sociaux et sociétaux au niveau de la population ainsi qu'au niveau du jeu des acteurs lié au partage des compétences administratives.

Ainsi cette démarche a permis de se rapprocher de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) afin de tenir compte des aspects liés au réemploi de certaines catégories de déchets inertes, et de mettre en place des recherches sur la qualification de ceux-ci. De la même façon, cette même démarche a permis d'obtenir une cohérence entre plusieurs types d'aménagement (voirie, ouvrages d'art, digues, station de traitement des eaux de pluie, aire de loisirs, ...).

La figure 1 reprend cette analyse qui montre que plusieurs objets ayant des fonctions proches peuvent se compléter et interagir.

Les trois cas d'études

1- Aménagement de Griesheim près Molsheim

En se basant sur le concept de développement durable qui suppose que l'on retienne à la fois les critères économiques, environnementaux, sociaux et sociétaux lors de la phase d'aménagement d'un site, le cas du village de Griesheim près Molsheim (Bas-Rhin) apparaît comme un cas exemplaire à exposer.

En effet, le village subit des inondations récurrentes du cours d'eau (Rosenmeer) du fait du développement de sa zone artisanale et de ses lotissements. Il a vu les eaux pluviales s'accroître en quantité et décroître en qualité. Cette situation a suscité la sensibilisation de la population, aussi bien aux inondations qu'aux problèmes de dégradation du cadre urbain. Dans ce contexte, on prévoit donc d'écarter les crues de ce cours d'eau en stockant le volume d'eau en excès dans un bassin de 100 000 m³ de capacité par la création d'une digue en terre.

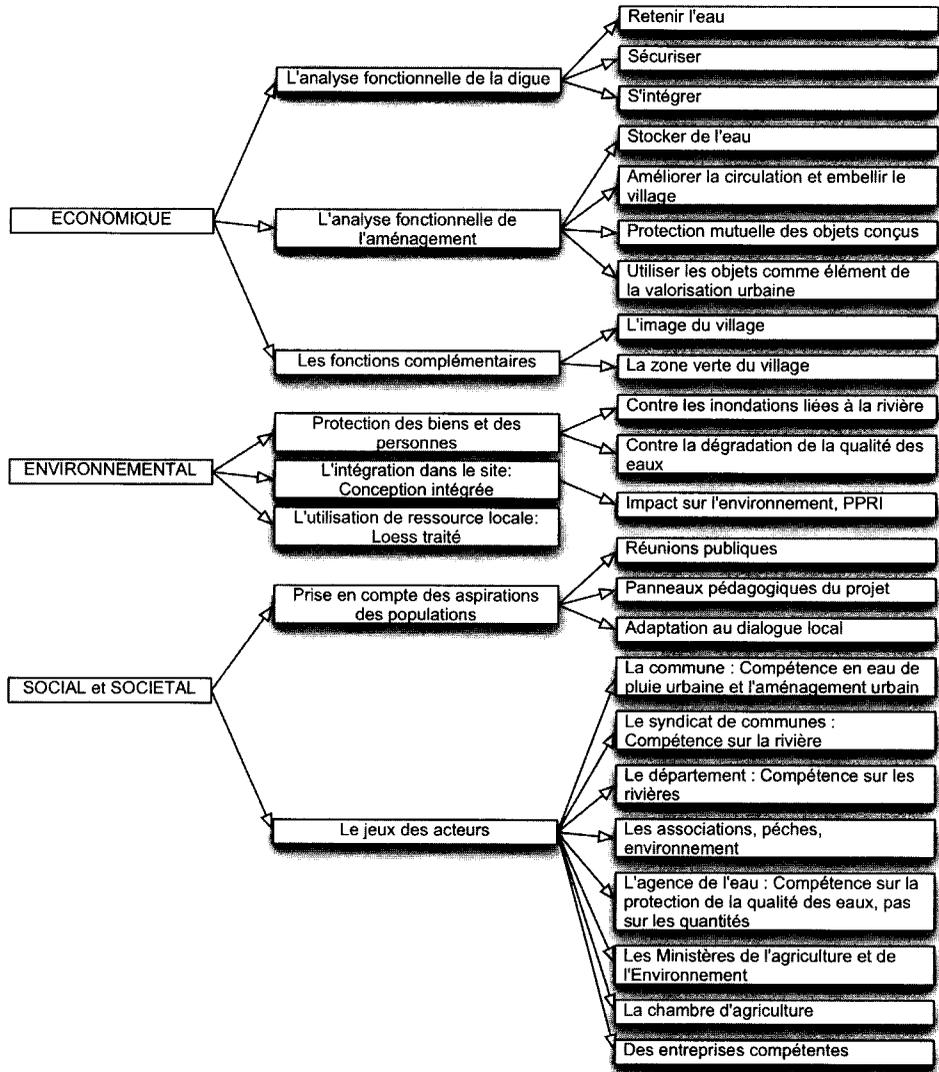


Figure 1 : Schéma d'aménagement suivant un concept de développement durable

Dans un même temps, les eaux pluviales en provenance du système séparatif d'une zone artisanale et celles issues d'un déversoir d'orage venant du système unitaire du village seront régulées par un dispositif composé notamment d'un partiteur avant rejet dans le milieu naturel et conformément à la loi sur l'eau.

Le projet d'aménagement a ainsi pris en compte les interactions entre les différents ouvrages à mettre en place sur le site, en tenant compte des aspects paysagers et de la loi sur l'eau (fig.2).

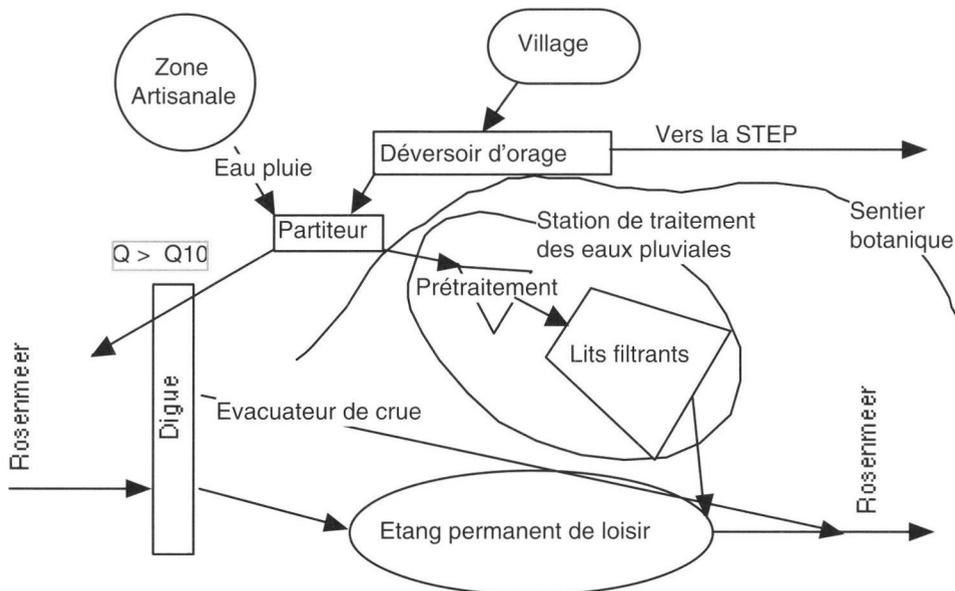


Figure 2 : Schéma fonctionnel de l'aménagement de Griesheim-près-Molsheim

La commune de Griesheim-près-Molsheim est située dans la plaine d'Alsace, à la limite du contrefort du massif vosgien. Proche des agglomérations d'Obernai et de Molsheim, deux pôles économiques dynamiques, elle possède un caractère résidentiel très marqué pour une population d'environ 1800 habitants (recensement 1999).

Le bassin versant de la commune se caractérise par deux zones distinctes. La première est située en amont de la commune de Rosheim dans les collines sous-vosgiennes présente une pente importante (environ 5%). La seconde, à l'aval de Rosheim, dans la plaine d'Alsace, se caractérise par une pente faible. Une étude

géotechnique réalisée en 1999 a montré que le site est constitué de limons argileux et d'argiles limoneuses d'une épaisseur de 3 à 5 mètres.

La région se caractérise par un climat semi-continentale avec des orages survenant de mai à septembre. La température moyenne annuelle est de 10 °C (période 1961-1995) et les précipitations annuelles moyennes de 611 mm (période 1946-1995). Le bassin du Rosenmeer est recouvert à 82% de forêts, vignes, prairies et champs. Les surfaces urbaines ne représentent que 18% de la surface totale du bassin versant.

La commune de Griesheim-près-Molsheim est implantée dans une dépression de la vallée du Rosenmeer. Celui-ci prend sa source dans la forêt de Rosheim et se jette à l'aval à Innenheim dans l'Ehn, affluent de l'Ill et du Rhin, dans le Bas-Rhin. Le Rosenmeer n'est pas un cours d'eau naturel au sens strict du terme, mais issu d'une dérivation. Il a subi de nombreux travaux (recalibrage, ...), et s'apparente plus à un fossé d'écoulement des eaux pluviales ; son bassin versant a une superficie de 18 km² à l'entrée du village.

Les débits du cours d'eau sont variables (inférieurs à 50 l/s de mars à octobre et 60 l/s en moyenne de novembre à mars). Des relevés ponctuels montrent que le ruisseau a souvent un débit inférieur à 20 l/s en amont de la station d'épuration (STEP) des eaux usées de Rosheim, surtout en fin d'été / début d'automne.

La détermination des crues décennale (2 à 5 m³/s) et centennale (5 à 8 m³/s), au niveau de la confluence avec l'Ehn, permet de distinguer les crues d'origine rurale, dues à des événements pluvieux de durée relativement longue et peu intense (ruissellement du bassin versant) et les crues d'origine urbaines, liées aux réseaux d'assainissement des communes traversées par le cours d'eau, et provoquées par la mise en charge du réseau pour des événements intenses et de courte durée de type orage.

Cette situation crée des débordements du cours d'eau dans les zones habitées. Ces débordements ont lieu aussi bien en été qu'en hiver, aux dires des riverains. Tous les cinq ans environ, ces débordements sont relativement importants, avec parfois jusqu'à 20 cm d'eau au centre du bourg. Les caves des habitations sont inondées. Ces crues interviennent surtout en été, lors d'orages violents, les eaux provenant des surverses des réseaux d'assainissement des communes à l'amont de Griesheim.

La possibilité de réaménagement du lit du cours d'eau afin d'éviter les débordements du Rosenmeer en crue est irréaliste. Canaliser ce type de cours d'eau dans la traversée du village compte tenu de l'occupation des habitations en haut des berges aurait un impact négatif sur l'environnement et représenterait un coût important. Enfin, l'évacuation rapide des débits de pointe par recalibrage du lit provoquera une aggravation des débordements dans la commune aval d'Innenheim.

Cet aménagement comprend donc :

- une digue homogène avec des talus à 3/1 de 4,50 mètres de hauteur construite avec les sols en place de classe A2 et A3 dont la teneur en eau est élevée et nécessitera un traitement à la chaux ; un système de drainage permettra de lutter contre l'érosion interne.
- l'évacuateur de crues (dimensionné pour une crue de projet de 20 m³/sec.) sera constitué d'un matelas Réno posé sur la digue aval avec bassin de dissipation d'énergie.

Sera associé à cet aménagement une station de traitement des eaux pluviales à lits plantés de macrophytes afin de respecter les objectifs de qualité du Rosenmeer et un petit étang de pêche complétera l'aménagement récréatif du quartier. Ces ouvrages sont les acteurs physiques majeurs d'un projet intégré.

2. Aménagement de VENDENHEIM

Le centre ancien du village s'étire le long d'un petit cours d'eau, le Muhlbaechel, affluent de la Zorn, à une quinzaine de kilomètres au nord de Strasbourg. Ce cours d'eau en crue sort de son lit et inonde les habitations situées le long de son tracé. Un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) est en cours d'élaboration.

La Commune, pour protéger les lieux habités, envisage deux solutions complémentaires consistant à créer une rétention en amont du bourg et à aménager ce cours d'eau abandonné par la renaturation de son lit, l'homogénéisation de son profil en travers, la stabilisation des berges par des techniques végétales et la création d'une promenade le long de son cours.

La maîtrise du foncier est délicate en raison de l'occupation des parcelles jusqu'en limite de son lit.

Le bassin de retenue engendré par une digue en terre permettra de franchir le vallon par une voie de contournement et une piste cyclable.

Une contrainte supplémentaire à intégrer est l'existence d'une Zone de Protection du Patrimoine Architectural Urbain et Paysager (ZPPAUP) qui protège le paysage et interdit le prélèvement de matériaux dans la future cuvette pour édifier la digue.

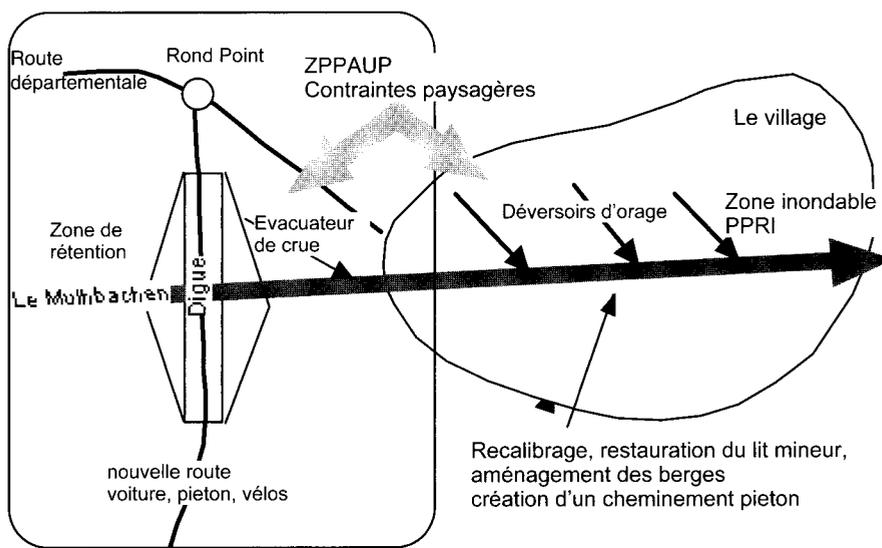


Figure 3 : Schéma fonctionnel de l'aménagement de Vendenheim

Les caractéristiques de l'aménagement pour écrêter à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ la crue décennale sont les suivantes :

- Hauteur de la digue : 4,50 mètres
- Largeur en crête : 14 mètres
- Longueur de la crête : 160 mètres
- Pente des talus amont et aval : 1/3
- Volume de la digue : $18\,000 \text{ m}^3$
- Volume stocké : $110\,000 \text{ m}^3$
- Crue de projet : $12 \text{ m}^3/\text{s}$
- Evacuateur de crue de type latéral.

L'aménagement hydraulique de l'ensemble (fig.3), a un coût estimé à 1 million d'euros, (digue et restauration du cours d'eau) et doit être soumis à l'autorisation du Préfet au titre de la loi sur l'eau, même si sa réalisation se fera par phases successives. Même si cet ouvrage n'intéresse pas la sécurité publique au sens strict de la réglementation, l'incidence de cet aménagement et son impact sur l'environnement sont examinés, y compris la détermination de la cote des eaux atteinte en cas de rupture brutale de la digue.

A ce stade d'avancement des études, il est intéressant de noter que l'origine du matériau destiné à construire la digue n'est pas connue, il est envisagé d'utiliser les loess traités issus des déblais du projet routier ou des matériaux sélectionnés issus des chantiers de terrassement des alentours.

Pour les élus, cet aménagement doit être à buts multiples et s'intégrer parfaitement dans la trame du paysage local en embellissant le centre village et redonnant vie au Muhlbaechel qui s'était petit à petit transformé en égout. Ainsi pour convaincre et séduire les élus, une étude paysagère a été nécessaire avec photomontage et croquis en perspective.

3. AMENAGEMENT DE HOHATZENHEIM

Ce petit village situé dans les collines du Kochersberg à 20 km au nord-ouest de Strasbourg subit depuis le dernier remembrement de 1969 des inondations et des coulées de boues qui empruntent la rue Principale jusqu'à la Mairie.

Le bassin versant inférieur à 100 ha est occupé par des cultures sarclées comme le houblon et le maïs qui favorisent les écoulements superficiels et « canalisent » les eaux en réduisant le temps de concentration.

La commune souhaite stocker ces ruissellements dans plusieurs petites retenues situées en amont du village et sur l'axe hydraulique.

Les contraintes de ce projet sont une topographie pentue peu favorable à l'édification de telles retenues, un exutoire caractérisé par une conduite d'eau pluviale de dimension modeste traversant le village et une occupation des sols par des houblonnières, en limite du thalweg, difficiles à déplacer sur le plan économique.

Le point favorable est l'existence d'une source pérenne qui pourrait être mise en valeur sur le plan paysager et éducatif.

La collectivité souhaite que cet aménagement hydraulique soit associé à un embellissement du quartier par l'implantation d'un arboretum, d'un sentier botanique autour du thème de l'eau.

L'édification de deux petites digues en terre de 4 mètres maximum de hauteur construites avec les matériaux du site et dont le talus aval penté à 1/4 (renforcé par un matelas Réno ou de l'Enkammat) est déversant est une réponse à ce problème.

Là encore, les difficultés résident dans l'intégration du projet dans la vie agricole et culturelle du village.

En position amont, l'action doit porter sur la maîtrise de la genèse du ruissellement en retardant le plus possible sa formation à l'échelle de la parcelle. Les techniques préconisées sont :

- l'enherbement de bandes pour limiter l'érosion
- des pratiques agricoles adaptées comme par exemple l'absence de retournement avant ensemencement.

Conclusions

Ces travaux menés dans un cadre universitaire ont deux finalités : apporter aux maîtres d'ouvrages des solutions multiples voire innovantes à leurs problèmes et aussi faire progresser les savoir-faire de l'établissement universitaire en le confrontant à des problématiques pluridisciplinaires.

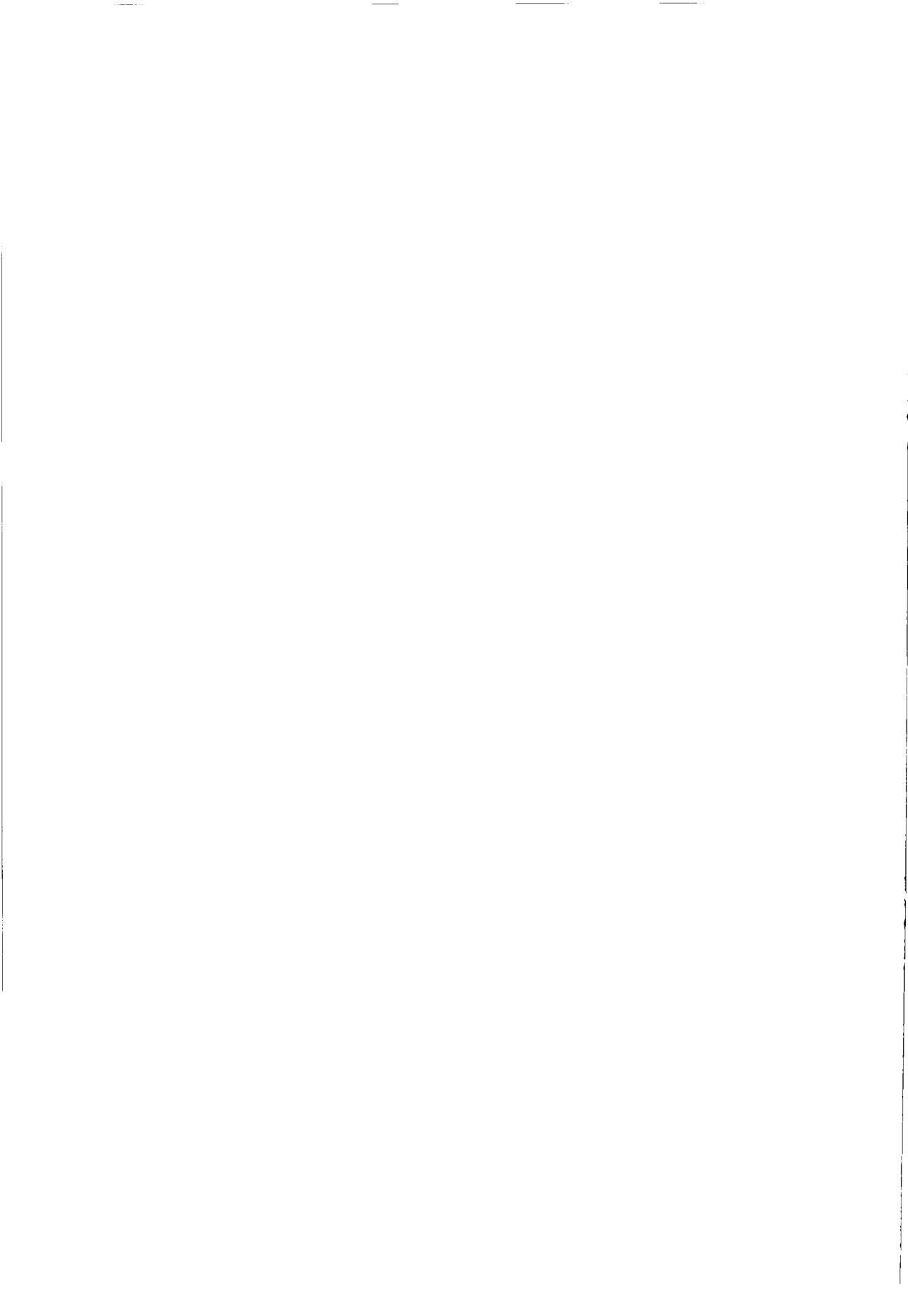
Il ressort de cette expérience que de nouveaux horizons de recherches ont pu être mieux cernés : par exemple au niveau technologique, le réemploi de certains matériaux inertes du génie civil, l'utilisation de loess pour la construction de digue, au niveau scientifique sur les modèles hydrologiques, au niveau des sciences humaines sur les problèmes de communication, de partage des compétences administratives.

Remerciements

Ce travail a demandé la participation active de nombreux acteurs que nous remercions : les nouveaux ingénieurs Laurent Pinsel, Yan Gruet, Benoit Calmettes, Jean-Philippe Fraysses, Cécile Haon, Antoine Portier, Frederic Verset, et Irénée Sanchez (Université de Grenade), les élus municipaux et les populations de Griesheim-près-Molsheim, Vendenheim, Hohatzenheim, la Communauté de Commune de l'Ehn, la Communauté Urbaine de Strasbourg, le Conseil Général du Bas-Rhin, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, la Chambre d'Agriculture d'Alsace, le Professeur Brunner (Université de Karlsruhe), les divers services administratifs et laboratoires de l'INSA de STRASBOURG, ...

Session 2

Bilan socio-économique et culturel de l'implantation d'ouvrages



Ressource hydraulique et diversification des usages. Le cas de la haute vallée de l'Arc (Savoie, France).

Hydraulic resources and uses diversification. The case of the upper Arc River. (Savoie, France)

Alain MARNEZY (Professeur à l'Université de Savoie ; Maire d'Aussois).

Université de Savoie. Laboratoire EDYTEM. Campus scientifique. Bâtiment Belledonne – 73376 – Le Bourget-du-Lac Cedex.
Tél . 04 79 75 87 37.. Fax 33 (04) 79 75 87 77.
E.mail : alain.marnezy@univ-savoie.fr

Résumé : A partir du cas de la haute vallée de l'Arc (Savoie, France), l'auteur montre comment, de sa seule fonction énergétique initiale, on est passé progressivement à une large intégration de la ressource hydraulique dans le développement touristique local : ré-investissement des redevances EDF versées aux communes dans les équipements de sports d'hiver, production de neige de culture, sports d'eaux vives, valorisation touristique des plans d'eau... La concertation est nécessaire entre l'exploitant hydroélectrique et les partenaires locaux pour concilier cette multiplicité des usages.

Abstract: *By studying the upper Arc River (Savoie, France), the author shows how the hydraulic resource use has evolved since 1970's. Initially, the hydraulic resource was only a question of energy by the way of electricity generation. This situation has progressively changed and at present the hydraulic resource plays an essential role in the local tourism development. For example, the EDF's license-uses are re-invested by communes to improve equipments, to produce artificial snow or to develop the tourism around artificial water storage plan. This evolution requires a broad dialogue between the different actors in order to manage these multiple hydraulic uses.*

Mots-Clés : Ressource en eau – Energie hydraulique – Développement touristique – Neige de culture – Vallée de la Maurienne (Savoie)

Key-words : *Hydraulic resource – hydro-energy – touristic devopment – artificial snow – Maurienne valley (Savoie)*

L'exploitation de la ressource hydraulique dans la haute vallée de la Maurienne a d'abord été le domaine exclusif de la mise en valeur énergétique, avec l'équipement hydroélectrique intégral de l'Arc et de ses affluents.

A partir des années 1970, la ressource hydraulique est devenue un outil du développement local, par le biais des redevances EDF réinvesties dans les équipements de sports d'hiver. Un essor touristique réalisé dans le cadre de stations-villages, de dimensions petites et moyennes. Cette participation au développement de nouvelles activités se poursuit aujourd'hui sous la forme de l'alimentation en eau pour la production de neige de culture, en même temps que les besoins ne cessent de s'élargir dans le contexte d'une diversification des ressources touristiques (sports d'eaux vives, valorisation de sites remarquables...). On assiste ainsi à une multiplication des usages dont la conciliation n'est pas facile ; elle fait naître de nouvelles contraintes, notamment en termes de protection et de préservation des milieux. Dans ce domaine, est amorcée une phase de reconquête, qui vise à atténuer les impacts d'une utilisation intensive et exclusive de l'eau sous sa forme énergétique. La diversification des usages de l'eau fait apparaître les limites des outils de gestion actuels. Comment concilier l'exploitation énergétique d'un aménagement intégral et la préservation des milieux naturels, les préoccupations d'une entreprise nationale soumise aujourd'hui à la concurrence et les exigences du développement local ?

I. LA FONCTION PREMIERE : LA PRODUCTION D'ENERGIE.

Dans le haut bassin de l'Arc, la ressource hydraulique n'a d'abord été appréhendée que pour son caractère de source d'énergie.

L'abondance des débits, le stock glaciaire, les fortes dénivelées faisaient de la haute Maurienne et de ses massifs encadrants (Vanoise, massifs frontaliers) un réservoir énergétique de premier ordre.

L'Arc	à Bonneval	à Bramans
Surface du bassin-versant :	81 km ²	635 km ²
Lame d'eau annuelle écoulée :	1403 mm	1044 mm
Débit spécifique :	44,4 l/s/km ²	34,2 l/s/km ²

Engagé dès le début du 20^e siècle, l'aménagement hydroélectrique traduit cette "fascination de l'hydraulique" qui a dominé durant de longues décennies.

- *Les premiers équipements.* Après une première centrale construite au début du XX^e siècle sur le torrent de Ste Anne dans les gorges de l'Esseillon par un entrepreneur privé, le premier équipement important est le barrage de Bramans, couplé à la centrale d'Avrieux (1923), équipement au fil de l'eau à objectif industriel

(usine St-Gobain). Il reproduit le schéma dit de la "technique de l'Arc", déjà appliqué à l'époque dans le reste de la vallée de la Maurienne.

- Un *projet de barrage au Plan d'Aval* sur la commune d'Aussois, préparé par l'AFC (Alais, Frogès et Camargue), après le grand chantier de Bissorte en 1935, est interrompu par la seconde guerre mondiale. Il est repris et réalisé par EDF (1950), sur le St-Benoît, grossi des eaux de la Vanoise, prélevées dans le bassin du Doron de Termignon. La retenue de Plan d'Amont vient accroître en 1955 les possibilités de stockage et de fourniture d'énergie à la demande. Plus récemment (1983), les captages du Povaret et du St-Bernard ont complété le dispositif.

- En 1959, la *dérivation du haut Arc* vers Tignes à partir du barrage de l'Ecot (Bonneval) est une application du principe de l'utilisation des "chutes potentielles", qui ne tient plus compte des bassins versants naturels.

- Le rattachement à la France du *plateau du Mont Cenis* en 1947 a rendu possible la réalisation en commun avec l'Italie d'un grand "réservoir de tête". Les Italiens avaient déjà aménagé en 1921 le lac naturel en réservoir de 31 Mm³ alimentant une suite d'usines dans le val de la Cenischia. Le nouveau projet restitue aux deux Etats une part des débits proportionnelle à la superficie de leur bassin versant respectif. Le bassin versant naturel du plateau du Mont-Cenis ainsi que les apports des galeries italiennes sont réservés à l'Italie (possibilité de stockage 51 Mm³) ; la France dispose des apports collectés par ses propres adductions (débits de l'Arc supérieur et de ses affluents, stockage 264 Mm³). En aval, la galerie capte d'autres torrents (Savine, Ambin, Etache, le Fond, Ste-Anne) avant de diriger les eaux sur la centrale de Villarodin (haute chute de 882 m, débit équipé de 51 m³/s). Ajoutons que la retenue du Mont-Cenis peut recevoir aussi les eaux de l'Arc supérieur depuis la prise d'eau de l'Ecot, qui peut ainsi être utilisée au mieux des besoins des deux réservoirs de Tignes et du Mont-Cenis. A l'instar de ce qui a été réalisé sur l'Isère avec le barrage de Tignes, la retenue du Mont-Cenis devient l'élément de base de tout le système, le barrage de tête du bassin mauriennais qui régularise l'ensemble des apports ; son plein remplissage a eu lieu en 1970.

Pour optimiser la valorisation de l'eau de la haute vallée de l'Arc et de la Vanoise, une connexion a été réalisée entre les aménagements du Mont-Cenis et le Plan d'Aval. Elle permet de stocker l'eau de fonte du massif de la Vanoise (150 km³ captés) dans la retenue du Mont-Cenis, pour la renvoyer dans le Plan d'Aval et la valoriser en pointes de consommation d'hiver sur les centrales d'Aussois et de la Combe d'Avrieux.

Le bassin du haut Arc se présente ainsi comme un cas d'aménagement intégral, où la recherche d'une valorisation et d'une exploitation énergétique a été maximale, à un moment où cet usage de l'eau était la préoccupation majeure (Fig.n° 1).

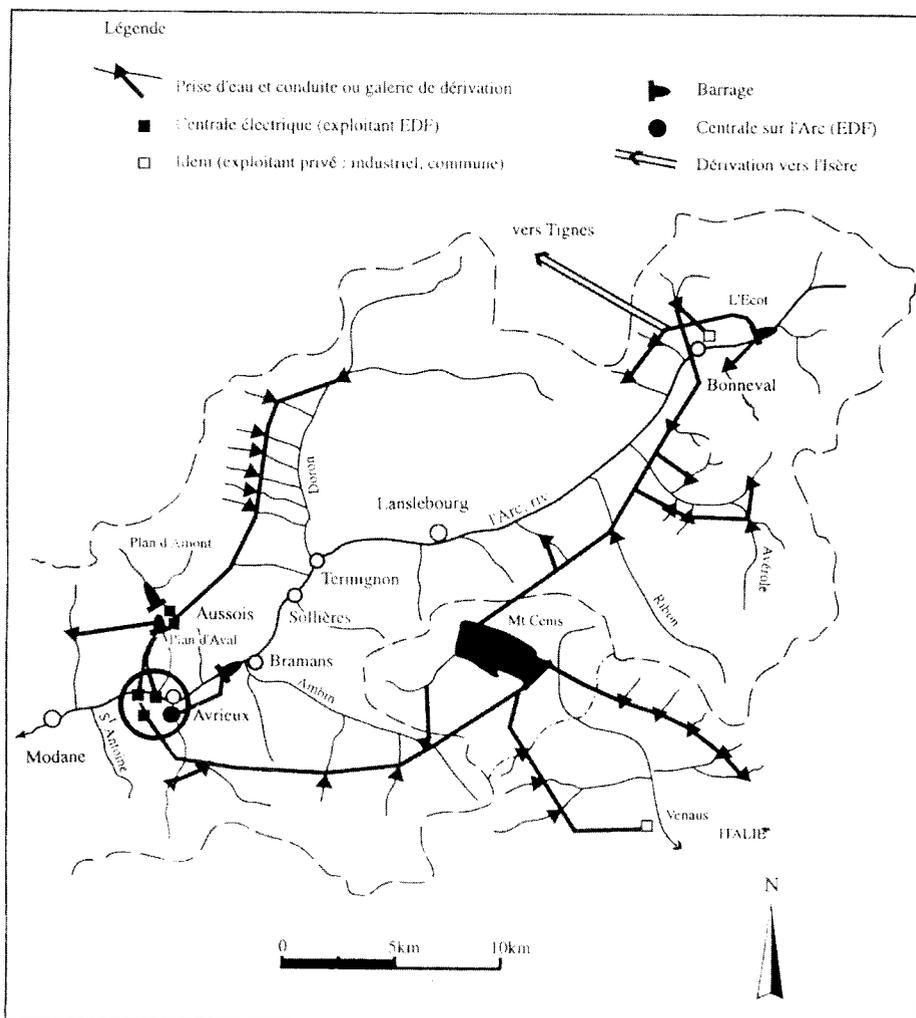


Fig.1 : Les aménagements hydroélectriques en Haute Maurienne.

II. LA RESSOURCE HYDRAULIQUE, FACTEUR DE DEVELOPPEMENT TOURISTIQUE.

Les communes et les partenaires locaux ont utilisé les retombées directes et indirectes de cette exploitation énergétique. La ressource hydraulique a été intégrée progressivement au développement touristique local.

1) L'effet chantier et après-chantier : une phase de transition vers l'économie touristique.

Les grands chantiers ont eu des répercussions sur l'économie et la démographie locales. La re dynamisation des communes a facilité le passage, dans les années 1960, d'une société agropastorale traditionnelle à une économie plus ouverte largement fondée sur le tourisme. - *Des effets démographiques* : l'embauche de la main d'œuvre locale a favorisé le maintien sur place d'une partie de la population jeune ; elle a été un frein, au moment opportun, à l'exode agricole et rural.

- *Des effets économiques* : développement et animation du commerce local (structures qui survivront pour la phase touristique) ; legs d'équipements en routes et pistes vers les hauts chantiers qui désenclavent les alpages et deviendront plus tard un appui dans les activités touristiques (route d'accès aux barrages d'Aussois, pistes de retour en stations...) ; héritages de bâtiments construits pour l'accueil et l'hébergement de la main d'œuvre des chantiers qui deviendront des logements touristiques ("maisons familiales", colonies de vacances...).

- *Un effet d'ouverture* : les apports et le brassage de population entraînés par les chantiers ont certainement préparé les populations locales à l'accueil de population extérieure aux villages.

2) Des revenus réinvestis dans les équipements de sports d'hiver.

Au moment de la mutation des années 1970, quand le tourisme d'hiver se généralise, les communes de la haute Maurienne, en phase de déclin agricole d'une part, mais aussi de recul de l'emploi industriel et tertiaire dans le bassin de Modane, se tournent résolument vers le développement touristique (déjà amorcé par une petite saison estivale). Elles bénéficient, avec les redevances EDF, d'une capacité d'emprunt sans rapport avec les possibilités budgétaires de communes rurales de mêmes dimensions (300 à 700 habitants permanents).

Ces ressources financières sont constituées des impôts locaux sur les équipements EDF (taxe foncière sur le bâti et taxe professionnelle liées aux barrages, conduites, dérivations, centrales). EDF est le plus gros contribuable de la plupart des communes de la haute Maurienne (Aussois, Termignon, Avrieux, Bonneval, Orelle...).

Autre source de revenus, les produits des régies électriques communales, mises en place à la fin des travaux. Selon des accords spécifiques et réalisés au cas par cas, elles bénéficient de livraison d'électricité à tarif réduit d'EDF, qu'elles redistribuent aux habitants à des prix plus élevés.

Grâce à ces revenus assurés, les communes et regroupements intercommunaux ont alors développé des stations-villages, dans des structures variées (régies communales, syndicats intercommunaux, SEM...), mais où la "manne EDF" a joué un rôle décisif dans l'investissement de départ, pour les premiers gros équipements (télécabines, télésièges...). Aujourd'hui, ces stations ont grossi, le nombre de lits a augmenté, le nombre de contribuables aussi (commerces, artisans...), le poids d'EDF s'est amenuisé en part relative, mais les revenus de

l'hydroélectricité continuent à participer de façon significative à l'équilibre financier de certaines stations (La Norma, Orelle, Aussois, Bonneval, Bessans, Termignon...).

Le rôle de la ressource énergétique locale a donc été déterminant dans le démarrage des stations de sports d'hiver en haute Maurienne. Le lien étroit entre hydroélectricité et développement touristique est incontestable. Dans un cadre géographique compartimenté, où la modestie des domaines skiables potentiels avait rebuté les promoteurs privés, et que le Plan Neige avait écarté, l'auto développement de ces stations sans les revenus EDF n'aurait probablement pas pu se réaliser.

Mais l'équation ressource hydraulique / développement touristique connaît aujourd'hui des mutations importantes.

III. DE NOUVEAUX USAGES POUR LA RESSOURCE HYDRAULIQUE.

L'intégration de la ressource hydraulique dans le développement touristique local va en se renforçant. Outre l'attrait, déjà ancien, des lacs EDF pour la pêche (Bissorte, Mont-Cenis, Plan d'Amont), de nouveaux usages apparaissent.

1) La fabrication de neige de culture.

Depuis les années 1990, comme dans l'ensemble de nos massifs, de nouveaux besoins se font jour pour satisfaire une clientèle touristique toujours plus exigeante.

La neige de culture apparaît indispensable pour assurer :

- un enneigement fiable de début et fin de saison ;
- des pistes de retour en station ;
- un enneigement convenable des champs de neige aux altitudes basses (grenouillères...).

Dans ce contexte, les équipements hydroélectriques de la haute Maurienne présentent un intérêt tout particulier, car ils permettent de disposer d'une eau propre, à température basse, parfois sous pression, et sont susceptibles d'offrir la solution la plus économique pour l'alimentation en eau des usines à neige.

Le prélèvement direct à partir des retenues EDF (Plan d'Amont à Aussois) ou à partir des galeries d'amenée (Val Cenis, La Norma) permet d'éviter la construction d'ouvrages de stockage et assure une alimentation régulière, sans gros investissement.

Le cas de la commune d'Aussois peut illustrer de manière symptomatique cette évolution des usages de l'eau. L'alimentation en eau pour la neige de culture résulte d'un "transfert" ou d'une transformation de débits réservés, à l'origine, pour l'irrigation des prairies de fauche et aujourd'hui excédentaires.

2) Le développement des sports d'eaux vives.

Dans la recherche d'une diversification des produits touristiques pour la saison estivale, certaines activités connaissent une demande croissante, comme les sports d'eaux vives, canyoning, canoë-kayak, rafting. Quelques tronçons de l'Arc supérieur (secteur de l'Ecot) se prêtent particulièrement bien au canyoning et sont intensément fréquentés durant la belle saison (Photo 1).

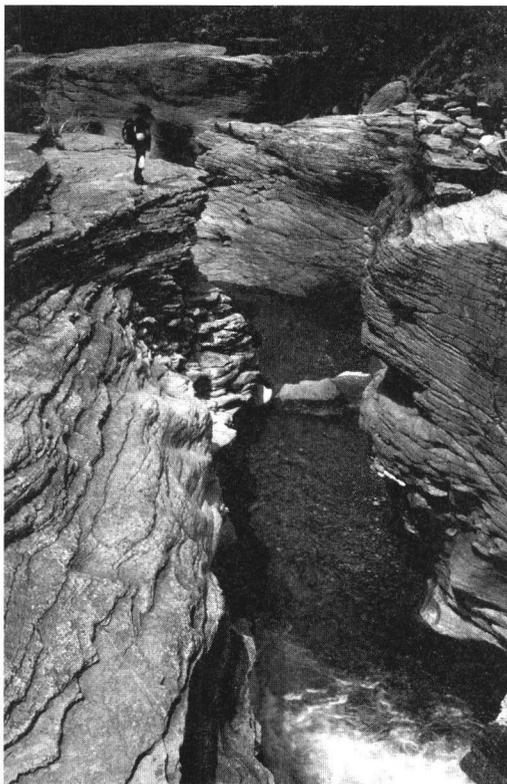


Photo 1 : Canyoning dans les gorges de l'Arc à l'Ecot.

3) La valorisation des sites touristiques.

Les réservoirs d'altitude sont devenus des sites attractifs pour le tourisme d'été. Le Mont-Cenis, où s'additionnent les attraits du barrage, du lac, du col et des prairies est l'un des sites les plus fréquentés de la Savoie, classé "site remarquable" par le Conseil Général (Photo 2).



Photo 2 : Barrage et lac du Mont Cenis.

Au Plan d'Amont, à l'attraction du barrage s'ajoute la porte d'entrée dans le Parc National de la Vanoise.

Quelques équipements facilitent la valorisation de ces sites et leur mise à disposition d'un plus large public :

- salle d'exposition-belvédère EDF du Mont-Cenis ;
 - panoramique et salle d'exposition à Avrieux ;
 - projet de salle historique des barrages dans la Maison du Patrimoine d'Aussois...
- Des journées "Portes Ouvertes" (centrales de Villarodin, d'Orelle...) deviennent des formes d'animation appréciées. Dans le cadre d'un tourisme culturel, patrimonial, l'eau se trouve intégrée au développement de nouveaux usages.

Mais ces nouvelles orientations ont mis en évidence un certain nombre de points noirs et ont permis de prendre conscience de quelques faiblesses. La multiplication des usages de l'eau engendre des conflits, qu'il est nécessaire de concilier aujourd'hui.

IV. DE LOURDS IMPACTS ET DES TENTATIVES DE REHABILITATION.

1) Les héritages des grands chantiers.

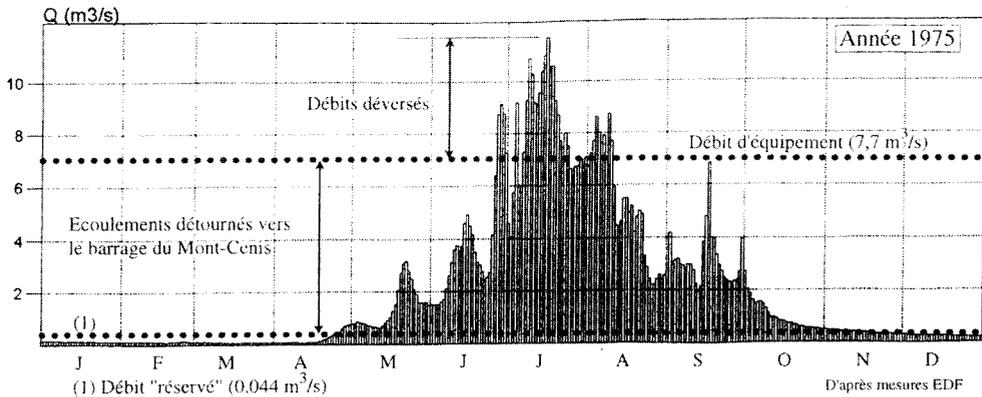
La valorisation paysagère récente se heurte à nombre d'impacts visuels hérités de la période où la seule préoccupation était la production d'énergie. Carrières, talus de déblais, terrassements, pistes d'accès, tout cela a laissé de larges cicatrices. S'y ajoutent les lignes électriques, les tranchées forestières... La disparition de sites patrimoniaux comme l'Hospice du Mont-Cenis a pu être considérée comme une perte majeure.

2) Les perturbations de l'hydrologie et ses conséquences.

L'artificialisation de l'hydrologie à l'aval des prises d'eau et des réservoirs d'altitude, sur l'Arc et ses affluents, a eu de multiples effets, qui se révèlent aujourd'hui comme des handicaps dans l'utilisation touristique de l'eau.

Les perturbations sont essentiellement l'amenuisement excessif des débits (Fig. 2), parfois réduits aux seuls débits réservés, les changements de rythmes (à l'échelle du jour, de la semaine, de l'année), fondés désormais sur les besoins de la production électrique ; ou encore des opérations de vidange (Plan d'Aval).

Fig.2 : Le torrent d'Avérole. Débits moyens journaliers à Avérole (1950m, 45.5km²).



Ces effets, conjugués localement à des phénomènes accentués de pollutions, perturbent profondément les équilibres hydrobiologiques des cours d'eau, handicapent la pêche (dont la demande s'accroît), rendent aléatoires les sports d'eaux vives sur certains tronçons, amputent les torrents de leur écoulement naturel à l'aval des dérivations...

Des problèmes de sécurité peuvent être posés par l'exploitation énergétique des cours d'eau :

- lâchers automatiques dans les lits torrentiels à l'aval des chambres de dégrèvement ;
- chasses effectuées sur l'Arc aux barrages de l'Ecot et de Bramans, ou sur le Doron à Entre-Deux-Eaux ;
- restriction et interdiction d'accès aux lits des rivières et torrents...

De nouvelles formes de conflits d'usages entre production énergétique, pêche, exploitation ludique et touristique des cours d'eau apparaissent ainsi, dont la conciliation est parfois difficile ; mais des essais sont tentés.

3) Tentatives de réhabilitation et de conciliation.

- *Des opérations de réhabilitation* des sites dégradés, pour une image re qualifiée de la montagne, compatible avec le développement touristique, notamment estival : suppression d'assises d'anciens pylônes, restauration de site d'anciens chantiers (gare supérieure du téléphérique d'Entre-Deux-Eaux au Plan du Lac à Termignon), opération Col Vert au Mont-Cenis, enfouissement de lignes électriques, revégétalisation de surfaces endommagées, réhabilitation de carrières...

- *Des expériences de concertation* : le cas de l'Ecot, évoqué ci-dessus, est intéressant puisque c'est la présence du barrage qui permet la pratique du canyoning, en captant l'essentiel du débit de fonte de l'Arc. Sans le barrage, cette activité serait impraticable. Elle est d'ailleurs interdite l'après-midi (à partir de 14 h) du fait des déversements dus à l'augmentation des débits, ainsi que le jeudi (réservé pour les opérations de maintenance d' EDF). Bon exemple du positionnement actuel d'EDF qui recherche, lorsque cela paraît économiquement possible, un compromis ménageant les autres usages sans mettre en jeu la sécurité des pratiquants. Dans le même esprit, une concertation s'est organisée récemment avec divers partenaires (Mairie d'Avrieux, association de pêche locale, Guides d'Aussois) sur l'exploitation du barrage de Bramans dans le but de concilier les exigences de maintenance, de sécurité, des activités d'eaux vives ou de la pratique de la pêche.

- *Des outils encore insuffisants* : un contrat de rivière sur l'Arc et ses affluents a encouragé la concertation entre tous les partenaires, a créé une structure de discussion. Mais il est apparu insuffisant dans la mise en oeuvre de solutions concrètes et d'une gestion intégrée.

Le cas du haut bassin de l'Arc illustre la diversification récente des usages de la ressource hydraulique. De la seule fonction énergétique initiale, on est passé progressivement à une large intégration de cet atout dans le développement touristique. Communes et partenaires locaux ont pu s'approprier, au moins partiellement, la ressource locale. La complexification des usages de l'eau fait cependant apparaître des problèmes de contraintes et de concurrence, et les outils actuels n'ont pas toute la pertinence souhaitée pour les résoudre.

Le Barrage du Salagou dans l'Hérault, vocation originelle et usages actuels

Bernard Dartau, Chef du service « Hydraulique, Irrigation »
Jean-Louis Brouillet, Chef du Service « Gestion globale des Milieux Aquatiques »
Département de l'Hérault
1000 rue d'ALCO 34087 MONTPELLIER CEDEX 4
tél : 04 67 67 65 02 fax : 04 67 67 75 84
courriel : dema-hydraulique@cg34.fr

Résumé

Le barrage du Salagou a été construit en 1964 par le Département de l'Hérault avec une importante aide financière du Ministère de l'Agriculture. Après avoir évoqué l'ambiguïté des objectifs d'origine, oscillant entre développement d'une agriculture irriguée et écrêtement des crues, l'article s'attache à rendre compte des usages actuels, parmi lesquels la fréquentation ludique voire touristique a pris un poids prépondérant. Une perspective historique sur la gestion de l'eau du barrage est dressée à partir à la fois du limnigramme de la retenue, de documents réglementaires ou des débats au Conseil Général.

Mots –Clés : barrage, irrigation, écrêtement des crues, plan d'eau de loisirs

Key words : dam, irrigation, flood control, tourist water-place

The Salagou dam in Hérault, initial aims and up to date uses.

Abstract

The Salagou dam was built in 1964, by the Departement of Hérault, with an important financial contribution of the Ministry of Agriculture. This paper shows firstly the ambiguity of the original dam purposes moving between development of an irrigated agriculture and floods mitigation. It then tries to describe the dam present uses, among which touristic or even ludic frequentation took a major place. The water level record, official documentation as well as the proceedings of the General Council of the Departement of Hérault are used to draw this historical perspective on the management of the stored water.

Pour cerner les objectifs d'origine du barrage, le présent article s'appuie sur une perspective à caractère historique sur le processus de décision du projet d'origine. Il s'appuie pour cela sur une relecture de documents des années 60. Toutefois, cette recherche n'est pas totalement aboutie et d'autres sources non utilisées mériteraient d'être consultées. On se contentera donc de donner certaines indications, que nous considérons représentatives de la réalité historique. Pour les usages actuels, il s'appuie sur des études plus récentes, à caractère écologique et socio-économique, et s'attache à retracer les problématiques qui se sont présentées au maître d'ouvrage dans le cadre de la gestion du barrage.

1 A l'origine, un double objectif d'irrigation et de laminage des crues

Le Salagou est un affluent de la Lergue, elle même affluent de l'Hérault à Canet, à l'entrée de la plaine alluviale. Le fleuve Hérault, qui donne son nom au Département, est un des fleuves côtiers à l'ouest du Rhône, entre le Vidourle et l'Orb : il draine un bassin d'environ 2500 km² entre le Mont Aigoual où il prend sa source et Agde où il débouche en Méditerranée.

1.1 Genèse de l'opération Salagou

C'est en 1959 que le Département de l'Hérault s'est porté maître d'ouvrage de la construction du barrage du Salagou. Il est utile pour bien cerner les objectifs d'origine de retracer le contexte et d'analyser le processus de cette décision.

L'aménagement régional pour le développement

L'État venait de créer la Compagnie du Bas-Rhône³ et construisait à grands frais un canal devant apporter l'eau du Rhône vers Montpellier et, selon les plans initiaux, bien au-delà jusqu'à Béziers. Il s'agissait d'offrir de nouvelles potentialités de développement par la reconversion de l'agriculture et le tourisme. Parallèlement, le Génie Rural ouvrait à l'agriculture grâce au drainage de vastes zones humides, les collectivités se groupaient pour assurer la démoustication et la mission Racine construisait les nouvelles cités littorales.

Du point de vue de la ressource en eau, le plan d'approvisionnement initial par le canal du Bas-Rhône venait d'être modifié pour tenir compte du fait que l'Orb possédait une ressource suffisante pour permettre une irrigation importante pour peu que l'on puisse réguler son débit entre hiver et été. Le barrage d'Avène sur

³ Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc, ou CNARBRL, 1955

l'Orb venait de faire l'objet d'une adjudication des travaux sous la maîtrise d'ouvrage de la CNARBRL.

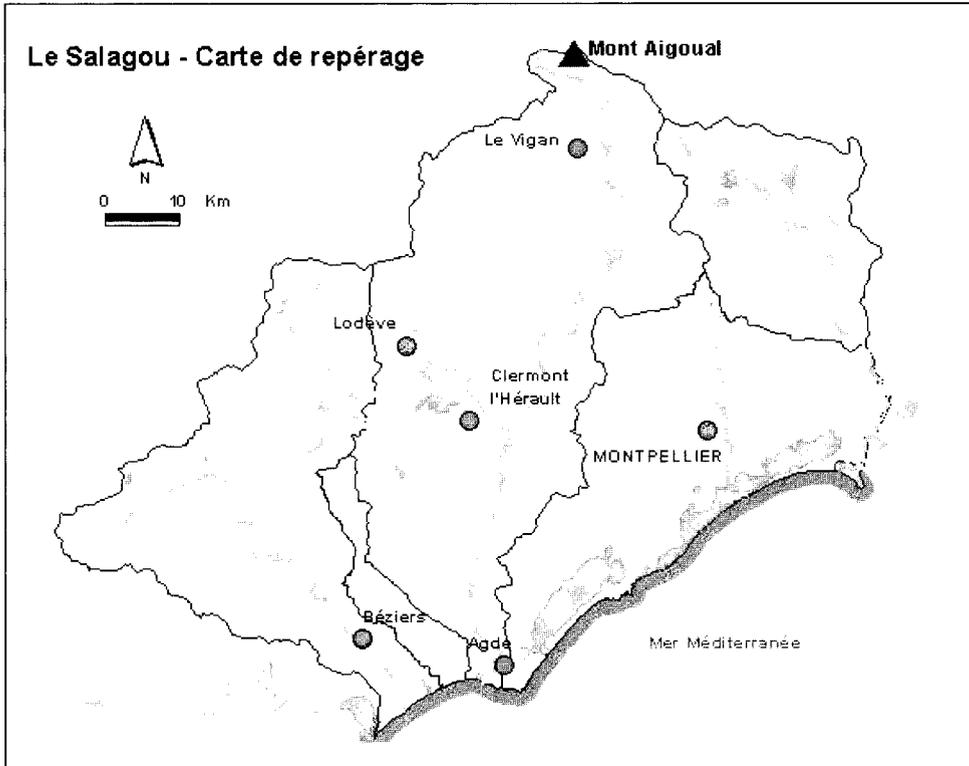


Figure 1 : Carte de repérage - CG34 – DARE DEMA Observatoire de l'eau et des milieux

Parallèlement, en matière de barrages, EDF construisait le barrage de La Ravière sur l'Agout et dans le Var, le barrage de Malpasset était en phase d'achèvement, pour ne citer que deux exemples parmi les nombreux ouvrages de cette génération. Incontestablement, le contexte de l'époque était favorable aux grands aménagements publics. L'agriculture était en recherche d'intensification avec le développement plus ou moins planifié au niveau national des réseaux d'irrigation sous pression, et du drainage des basses plaines.

Un grand barrage pour écrêter les crues de l'Hérault : Saint-Guilhem

Le Conseil Général, dans sa session du 23 mai 1958, s'était contenté de donner acte à la Compagnie BRL de son étude d'avant-projet d'un barrage à Saint-Guilhem-le-Désert, pour l'écrêtement des crues de l'Hérault. L'idée de ce projet remonte au moins aux années trente. Le 30 septembre 1958, le haut bassin de l'Hérault et le bassin des Gardons, puis le 4 octobre celui du Vidourle subissent

des crues catastrophiques. Dans le Département du Gard voisin, un vaste programme de barrages écrêteurs allait se décider pour le Vidourle et les Gardons. Le projet de Saint-Guilhem est alors à nouveau soumis au Conseil Général. Cette fois-ci, il décide⁴ le principe de s'en porter maître d'ouvrage en exprimant toutefois des réserves importantes :

- le financement : l'Etat apportera-t-il son soutien ?
- la géologie : le karst permettra-t-il de retenir l'eau ?
- le préjudice porté à la micro-centrale du Moulin de Bertrand, créée en 1922 par la Coopérative d'Électricité de Saint-Martin de Londres, et que le futur barrage noierait.

Le ministère de l'Agriculture, saisi de la question, souhaite étudier plus globalement la question des crues de l'Hérault et confie au professeur Tricart de l'Université de Strasbourg une étude de faisabilité à caractère hydrologique et géologique essentiellement.

L'État propose le Salagou

La réponse du professeur Tricart⁵ est présentée au Conseil Général en mai 1959. Pour réduire efficacement les crues de l'Hérault, il faudrait au moins deux barrages majeurs, Saint-Guilhem-le-Désert et ... le Salagou. Mais, le barrage de Saint-Guilhem ne serait pas étanche et ne permettrait pas de faire de l'irrigation. Au contraire, le barrage du Salagou permettrait de constituer une réserve fantastique avec une garantie totale d'étanchéité. D'ailleurs, il écrêterait très bien les crues du Salagou, particulièrement violentes vu la nature des terrains du bassin, pentus et imperméables : les fameuses ruffes du Lodévois.

Cet avis technique, on le voit, posait très clairement la problématique au-delà du champ de la préoccupation d'origine du Département, qui était essentiellement l'écrêtement des crues. Mais, les débats des élus sur le barrage montrent que le développement économique, et l'emploi étaient aussi au centre de leurs attentions. Il est dit aussi qu'un grand barrage dans la vallée de l'Hérault, permettait de faire l'économie de la prolongation du canal au-delà de Montpellier.

Le Ministère, en transmettant l'avis du professeur Tricart au Département⁶, ajoute que si le Département se porte maître d'ouvrage de la réalisation du barrage du Salagou, il l'aidera immédiatement au taux de 60%. Au contraire, s'il veut réaliser le projet de Saint-Guilhem, le ministère de l'Agriculture n'aidera pas le Département. On n'a pas d'information précise sur la position du Ministère de l'Équipement. Peut-être, la crue de septembre 1958 n'ayant pas gravement touché les zones urbaines de l'aval du bassin, la problématique lieux habités n'était-elle pas au devant de la scène.

⁴ Compte rendu des débats du Conseil Général – session du 6 décembre 1958

⁵ Tricart J., 21 avril 1959. *Etude hydrologique de l'Hérault*, Ministère de l'Agriculture – Université de Géographie de Strasbourg

⁶ Compte rendu des débats du Conseil Général - session du 22 mai 1959 (46 p)

Une décision débattue au fond, mais rapide

L'examen des rapports faits par le Préfet au Conseil Général sur la question (on est bien avant la décentralisation) laisse l'impression que l'effet écrêteur du barrage du Salagou ait pu en quelque sorte être un argument de séduction. Il semble que jamais, il n'ait été précisé que le bassin intercepté par le barrage du Salagou est de 75 km², contre plus de 1 000 km² pour le barrage de Saint-Guilhem, ce qui donne une idée de l'efficacité respective de chaque barrage pour écrêter les crues. Un autre point du débat est la rentabilité, ou l'utilité sociale du barrage conjugué avec la question de la maîtrise d'ouvrage que la CNARBRL pouvait aussi assumer.

Avec une opposition très minoritaire (2 voix contre), la maîtrise d'ouvrage est décidée le 22 mai 1959.

Les interventions de M. Bauzil, ingénieur de la Compagnie⁷, devant l'assemblée départementale sont convaincantes. Surtout, les 60% de subvention restent l'argument décisif, et le Département confirme en novembre 1959 l'engagement des dépenses et des recettes pour la construction du barrage.

1.2 Une réalisation technique remarquable qui bouleverse le paysage

Il faudrait éclaircir le niveau de précision avec lequel le dossier a été présenté au Conseil Général. On retiendra que le projet d'origine (barrage de 170 millions de m³ à la cote 151 mNGF) est reporté, suite semble-t-il à un appel d'offres infructueux. Un projet réduit (barrage à la cote 145, volume maximum de 125 millions de m³) est présenté en 1962 et négocié avec les entreprises, ce projet réservant la possibilité technique de surélever un jour le barrage à la cote 151.

La DUP est publiée par décret en 1962⁸. Les acquisitions de terrains se font jusqu'à la cote 150, pour réserver une rehausse ultérieure. L'examen des conditions dans lesquelles se sont faites les acquisitions mérite une étude spécifique. On sait que certains souvenirs restent profondément ancrés, témoignant d'un traumatisme très vif⁹. Notamment à Celles, on aurait déplacé le cimetière et les maisons du village ont été achetées alors que finalement, le village n'a pas été noyé.

L'ouvrage se réalise de 1964 à 1968. Les dépenses d'investissement pour le barrage, sans compter la déviation de la RN9, sont au moins de 63 millions de F de l'époque (marché principal BEC – MAZZA – Les Travaux Souterrains et Neyrpic

⁷ Compte rendu des débats du Conseil Général - session du 19 novembre 1959

⁸ Décret du 24 août 1962 déclarant d'utilité publique les travaux de construction d'un barrage réservoir sur la rivière le Salagou

⁹ Chalaguier André et Claude, Dunoyer Robert et Jean-Paul, 1980. *Salagou, Paysages disparus au fond du lac*

pour les équipements). Ce montant équivaut au moins à 70 M€ d'aujourd'hui. La réalisation est remarquable et l'ouvrage rendu est de grande qualité.



Figure 2 : carte postale éditions SL Clermont l'Hérault

Le fonctionnement prévu à l'origine : lâcher chaque année des volumes très importants

Par les études hydrologiques¹⁰, on sait que la prévision était d'irriguer 40 000 ha ouverts à la diversification dans la vallée de l'Hérault, et d'utiliser pour cela un volume d'environ 40 millions de m³ chaque année. Cela correspondrait à un marnage annuel très important du barrage, dont le remplissage devait être garanti par une galerie en provenance de l'Orb, puis de la Lergue.

Les autres éléments utiles à la compréhension de la genèse du projet sont la première convention d'exploitation du barrage de 1972, la convention de Gourdibeau de 1968 et les arrêtés d'autorisation des captages de Gourdibeau, Le Pouget, Usclas et la Devèse.

La convention pour l'exploitation du barrage prévoit en effet que le barrage sert directement les réseaux d'irrigation de la vallée de l'Hérault par un adducteur en

¹⁰ CNARBRL – mai 1962, *Aménagement du Salagou – Étude hydrologique*

prise directe sur la conduite de prise de la retenue. Le Département devait même recevoir une rémunération annuelle garantie pour la mise à disposition de cette eau. Parallèlement, le réseau de Gourdebau, le premier posé, s'alimente directement dans l'Hérault, l'adducteur depuis le barrage restant prévu en phase ultérieure.

Un peu plus tard, les arrêtés préfectoraux qui autorisent les stations de pompage de BRL dans la vallée de l'Hérault prévoient que, lorsque l'Hérault voit son débit se tarir en dessous d'un débit seuil de 3 à 5 m³/s selon les stations, les prélèvements doivent s'arrêter ou bien être compensés par des lâchers équivalents du barrage du Salagou.

Le barrage est mis en eau beaucoup plus rapidement que prévu à la faveur de deux années très pluvieuses, entre mars 1969 et mars 1971. On retiendra que les deux objectifs officiels du barrage sont :

- l'écrêtement des crues
- l'irrigation.

2 Les fonctions actuelles : une irrigation marginale, un lac touristique

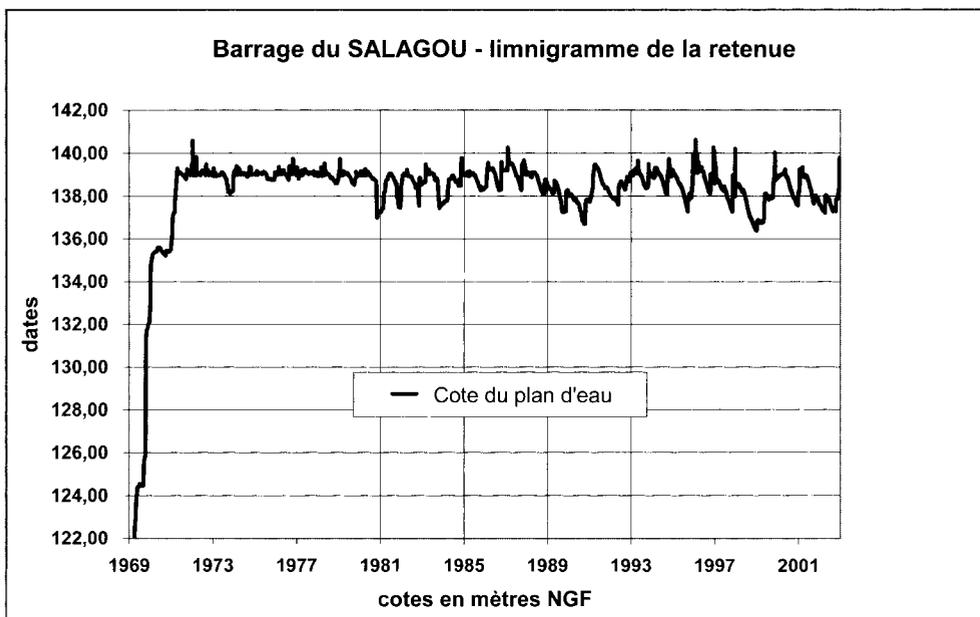
2.1 Les fonctions d'origine restent marginales

Dès la mise en exploitation, le barrage devient lac

En réalité, les réseaux se construiront à partir de pompages dans l'Hérault, ce qui permet d'économiser la pose d'une longue tête morte. La partie de la convention d'exploitation relative à la rémunération du Département reste ainsi inappliquée. Par ailleurs, l'adduction depuis la Lergue n'est pas réalisée.

Le limnigramme du plan d'eau montre que depuis le remplissage initial, le marnage est resté faible, autour du niveau normal de 139 m NGF, entre un minimum observé de 136,60 et un maximum de 140,62.

Figure 3 : le limnigramme du plan d'eau depuis le premier remplissage (CG34 d'après BRL)



Le développement de l'irrigation reste limité, le marnage du lac aussi

Effectivement, un développement de l'irrigation beaucoup moins rapide que prévu, conjugué à un remplissage précoce du lac (mars 1969 - mars 1971) et à un intérêt paysager et touristique immédiat ont contredit toutes les prévisions d'origine. Les surfaces équipées par réseaux sous pression à la demande sont aujourd'hui de l'ordre de 6 000 ha dans la vallée de l'Hérault, mais ceux-ci sont alimentés principalement à partir du fleuve. Le lac alimente directement deux petits périmètres irrigués (Octon et Le Bosc) d'environ 500 ha au total. Le barrage est donc resté plein les premières années, et de plus n'a jamais été vidangé, les inspections décennales successives ayant toujours donné lieu à des dérogations à l'obligation de vidange. De ce fait, le public s'habitue à voir un lac et le plan d'eau devient immédiatement très apprécié.

L'installation de la micro centrale en 1986 vient quelque peu modifier la gestion du barrage en incitant à faire marnier le plan d'eau davantage. Au débit maximum, le volume lâché avoisine 15 millions de m³, ce qui a pu faire descendre le plan d'eau certaines années sèches en dessous de la cote 137, pour un niveau normal à 139 m NGF. Mais, ce marnage reste limité en proportion de la capacité du lac et les étiages de l'Hérault ne sont pas soutenus de manière importante : 500 l/s en général en été pour un étiage pouvant avoisiner 2 m³/s les années sèches, voire moins.

Un écrêtement des crues bien réel mais peu perceptible

La fonction écrêtement des crues consiste à accumuler les crues au-delà du niveau normal, puis, à relâcher ces volumes dans les jours qui suivent pour reconstituer la capacité de stockage transitoire. La plus forte crue observée au barrage en terme de marnage positif maximum est celle du 29 janvier 1996, où le débit entrant a dépassé 300 m³/s pour un débit lâché de 30 m³/s. La crue du 18 janvier 1972 avait atteint un niveau comparable. Aucune crue n'a nécessité de lâcher plus de 30 m³/s jusqu'à ce jour. A titre de comparaison, les premiers débordements de l'Hérault se produisent dans le secteur de Paulhan – Pézenas pour des crues de 500 m³/s environ et des crues de 1500 m³/s sont assez fréquentes. La crue de décembre 1997 a dépassé 2000 m³/s.

On remarque toutefois en 1980 et pendant quelques années la constitution d'un creux volontaire jusqu'à la cote 137 pour optimiser la fonction d'écrêtement.

Mais les riverains de l'Hérault en aval de Canet -ou le bassin dépasse 2000 km²- voient les crues se produire à peu près comme avant du fait de la petite proportion de bassin contrôlée par l'ouvrage, même si le barrage lamine parfaitement les crues du Salagou. Pire, des rumeurs circulent à chaque crue importante faisant croire que ce sont les lâchers du barrage qui provoquent les crues de l'Hérault. Certaines montées brutales objectivement observées mais dues aux conditions de propagation naturelles de la crue sont attribuées à tort à des lâchers du barrage. La couleur des eaux est considérée comme une preuve, alors que si effectivement les terres du bassin du Salagou sont rouges, celles de la Lergue aval sur plus de 200 km² le sont tout autant. Une analyse hydraulique de la gestion du barrage comparée aux enregistrements de crue de l'Hérault a démenti cette rumeur¹¹ mais l'irrationnel est souvent le plus fort.

2.2 Des usages nouveaux s'installent précocement et durablement

Évaluation des usages nouveaux

A l'occasion de l'inspection décennale de 1997, le Département a sollicité du Ministère de l'Environnement une dérogation à l'obligation de vidange. A l'appui de cette demande il a fourni une étude technique de faisabilité de travaux de gros entretien sans vidange¹², notamment sur la vidange de fond, et une étude d'évaluation des impacts d'une éventuelle vidange¹³. Ce dernier dossier a permis de mettre à plat une quantification des usages du lac et a pointé les inconvénients

¹¹ Rapport de la mission d'inspection spécialisée de l'Environnement sur la crue de décembre 1997 – Philippe Huet et al - 1998

¹² COYNE et BELLIER, septembre 1995. *Préparation de l'inspection décennale 1997 – Expertise et investigations*

¹³ AQUASCOP – IARE, juillet 1996. *Évaluation des conséquences écologiques et socio-économiques d'une éventuelle vidange*

pour l'environnement d'une vidange totale ou partielle¹⁴. Comme indiqué plus haut, les usages nouveaux prennent leur place très tôt.

Un milieu aquatique de bonne qualité

Le lac du Salagou est un milieu relativement protégé des pollutions, son bassin étant resté en grande partie naturel. Il n'y a aucun foyer de pollution important, et il reste à l'écart des grands axes de circulation même si l'A75 est toute proche. La population du bassin est estimée à 500 personnes en hiver et 4 300 personnes en été. Aucune industrie n'est implantée sur le site. Les analyses effectuées par la DDASS sur sept sites de baignade affichent une eau de bonne qualité bactériologique. Il n'y a pas de signe d'eutrophisation.

La lac est toutefois vulnérable : les sédiments sont riches en phosphore, l'érosion des pélites du bassin est importante et les alluvions comblent localement la queue du lac, permettant en contrepartie un développement de roselières importantes, d'un grand intérêt écologique (avifaune).

Une fréquentation touristique et de proximité importante

La pêche au Salagou est très appréciée (carpe, brochet) et motive le déplacement de pêcheurs de l'Europe entière. C'est aussi au Salagou (Octon) que la Fédération Départementale a son siège.

En début d'été, des algues et végétaux aquatiques se développent près de la berge. Une partie d'entre eux doivent être faucardés ou enlevés des plages où ils s'échouent. Le fond parfois limoneux n'est pas toujours très apprécié mais l'activité de baignade reste un attrait compte tenu de la chaleur estivale. Le site est aussi fréquemment venté, exposé à la tramontane. La planche à voile et la voile appellent une fréquentation importante l'été des deux bases nautiques à Clermont et Celles.

Le paysage, sauvage, est grandiose et le patrimoine ethnographique remarquable¹⁵. L'agriculture, surtout viticole, occupe les pentes les plus faibles. Ailleurs, les pentes de terres rouges, partiellement couvertes en garrigues ou boisements bas, sont couronnées de plateaux basaltiques pacagés par des ovins et donnant un cachet certain au paysage. Une fréquentation de sportifs adeptes du vélo tout terrain constituent une clientèle pour des loueurs de VTT, activité pour laquelle le lac est reconnu.

Les structures d'hébergement sont restées dispersées et ont gardé un caractère traditionnel.

¹⁴ Goguel B., Carlier D., Dartau B. et al., *Barrage du Salagou, Renforcement par pré-contraînte des rainures à batardeaux sous 50 m d'eau*, Communication à la journée d'études « Barrages et tunnels » du SNBATI, Paris, 9 décembre 1998

¹⁵ Martin Philippe, mars 1992. *Salagou, pays fantastique* - Ecologistes de l'Euzière - SIAT du Salagou

Estimation de l'activité économique locale induite par le lac

L'estimation de l'aire économique d'influence du barrage recouvre la petite couronne des 6 communes autour du lac et la grande couronne incluant Lodève et Clermont – l'Hérault. La fréquentation touristique, plus de 500 000 personnes par été, et autant le reste de l'année, induit un service d'hébergement et de commerce d'alimentation. L'étude citée estime le chiffre d'affaire des activités économiques liées à la présence du plan d'eau à 60 millions de F/an (1996). On signalera toutefois que, si le barrage induit des retombées économiques, elles ne se traduisent pas par une rémunération directe du Département, qui assume la charge financière de l'exploitation du barrage.

On retiendra que l'économie touristique qui s'est développée autour du lac est significative. L'étude citée, ce n'était pas son objectif, ne la compare pas à l'économie agricole qui se serait développée elle aussi dans la vallée du Salagou. On n'a donc pas une réelle évaluation de l'impact du barrage de ce point de vue.

Implication des partenaires pour la gestion de l'eau

La gestion de l'eau du barrage est restée confidentielle pendant longtemps, faute de matière il est vrai puisque l'action de gestion était limitée à gérer un plan d'eau quasi-constant. Depuis les années 90, le Département fait établir des bilans précis de la gestion des crues et des étiages.

Depuis 1996, une commission consultative a été créée pour rendre compte aux élus du Département, aux services de l'État et aux usagers de l'eau dans la vallée de l'Hérault, de la gestion de l'année écoulée et recueillir les avis pour la gestion de l'année à venir. Cette commission est composée des Conseillers Généraux des cantons du bassin de l'Hérault concernés par le Salagou, c'est-à-dire ceux jouxtant le lac et ceux situés plus en aval.

Elle se réunit une fois par an, et en cas de besoin particulier. Par exemple, des réunions d'informations spécifiques ont été organisées au cours de l'inspection décennale de 1997. Cette inspection a donné lieu à une dérogation à l'obligation de vidange et a été suivie de travaux subaquatiques importants en 1999.

Le plan de gestion, le classement du site et le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin de l'Hérault

Sur le bassin du fleuve Hérault, une procédure d'élaboration de Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux a été engagée. Une Commission Locale de l'Eau est en place, un animateur a été recruté pour rédiger le SAGE. Le barrage du Salagou est le seul équipement hydraulique structurant du bassin. Son rôle fera donc l'objet d'une discussion.

Autour de cette réserve d'eau, le Département possède aussi un patrimoine foncier de 900 ha. La partie agricole de ces terres a fait l'objet de baux précaires passés

avec les agriculteurs, souvent les anciens propriétaires. L'éventualité d'une rehausse du barrage faisait peser une incertitude sur la pérennité de ces locations jusqu'en 1996. La menace de cette rehausse a été levée en 1996 par une délibération du conseil général¹⁶ et, fait anecdotique mais significatif, ce n'est qu'à cette époque que la crête du barrage a été dotée d'un garde corps. Cette décision exigeait que le Département fixe de manière plus précise les orientations en matière de gestion de l'espace.

En 2000, le Salagou a alimenté un débat très vif lié à une initiative privée d'installation d'un grand ensemble touristique avec golf, aujourd'hui abandonnée.

En 2001, le Département a souhaité formaliser un partenariat avec les acteurs locaux de la vie du lac (communes, usagers divers) en élaborant un plan de gestion¹⁷. Ce plan, élaboré sur une période de deux ans par un bureau d'études missionné par le Département, a été écrit en concertation avec les acteurs locaux associés dans un comité de pilotage. Approuvé par ce comité le 14 mai 2003, il vise cinq objectifs :

- la protection et la mise en valeur du patrimoine naturel, bâti et paysager,
- l'organisation de la fréquentation,
- le développement économique,
- l'urbanisation,
- la vie locale.

Pour le mettre en œuvre, le Département travaille à la création d'un Syndicat Mixte l'associant aux communes et à leurs groupements.

Parallèlement l'État avait engagé une procédure de classement du site pour en assurer sur le long terme la protection. Cette procédure est aboutie récemment¹⁸.

Salagou et développement durable.

Par rapport au bouleversement qu'a constitué la création du barrage, il semble qu'il y ait aujourd'hui, comme depuis la mise en eau, une convergence d'opinions pour à la fois conserver l'image actuelle du lac, et en permettre un développement économique respectueux de l'environnement. Le barrage du Salagou pourrait-il devenir un exemple de développement durable ?

¹⁶ Délibération du Conseil Général de l'Hérault du 5 février 1996

¹⁷ CG34, mai 2003. *Plan de gestion du site du Salagou*

¹⁸ Décret du 21 août 2003 portant classement du site du Salagou

Bilan économique et social des usages sur la retenue de Vouglans

Social and economic assessment of tourism and recreational activities on the Vouglans reservoir

Auteurs :

Madame Marie-Christine DALLOZ, Conseillère Générale. Département du JURA
17 rue Rouget de Lisle, 39039 LONS LE SAUNIER cedex
Téléphone : 33 3 84 87 34 .Fax : 03 84 87 35 00.
E-mail : mairie.martigna-39@wanadoo.fr

M. Luidgi MEI et M. Jean-Luc PIGEON, COYNE ET BELLIER
9 allée des Barbanniers, 92632 GENNEVILLIERS Cedex
Téléphone : 33 1 41 85 03 18. Fax : 33 1 41 85 03 74
E-mail : luidgi.mei@coyne-et-bellier.fr ; jean-luc.pigeon@coyne-et-bellier.fr

Résumé :

Le bilan des usages sur la retenue de Vouglans montre que l'endroit est devenu le lieu d'une activité touristique d'importance majeure pour l'économie locale et régionale. Les enquêtes soulignent que les Jurassiens se sont appropriés cet espace, et qu'ils pratiquent toutes sortes d'activités liées au plan d'eau et à l'attrait de son paysage. Dans les limites de l'usage hydroélectrique, le réservoir de Vouglans représente un attrait de par : (i) son plan d'eau pour les sports nautiques et la baignade, (ii) son cadre physique qualifié de « naturel » pour la pratique d'activités pédagogiques et de randonnées ; (iii) ses ressources piscicoles pour la pratique de la pêche, et ; (iv) les efforts de développement du département du Jura. De cette manière, la retenue de Vouglans constitue un exemple particulièrement intéressant de développement du secteur touristique ; elle est aussi devenue pour les Jurassiens, un élément de leur patrimoine social et culturel.

Abstract :

The Vouglans reservoir has become a major recreational spot for tourism and an important resource for local and regional economies. The local population is familiar with the site and practises all kind of activities related to the lake and the attractive landscape. Besides its hydroelectric use, the Vouglans reservoir represents an attractive place, linked to: (i) the stretch of water for water sports and swimming, (ii) the physical environment, often referred to "natural", for hiking and pedagogic activities, (iii) the fish stock for fishing, and (iv) the planning efforts of the Département du Jura. The local people now feel that the Vouglans reservoir is part of the social and cultural heritage. It constitutes an interesting example of tourism development on an hydroelectric reservoir

Mots-clés : retenue, usages, tourisme, jura

Keywords : réservoir, tourism, Jura

Introduction

La chaîne d'aménagements hydroélectriques de Vouglans, dans le Jura, comprend plusieurs ouvrages et retenues, jusqu'à Allement, dans le département de l'Ain. Elle est notamment composée d'un grand réservoir de tête – Vouglans – qui permet de régulariser les apports au fil de l'année.

Tableau 10 : caractéristiques des ouvrages de la chaîne d'aménagements de Vouglans

	Capacité utile ¹⁹ (hm3)	Puissance max. (MW)	Débit max. (m3/s)	Productible (GWh annuel)
Vouglans	419,4	280	324	270
Saut-Mortier	0,9	42	220	72
Coiselet	3,6	40	240	110
Bolozon	2,7	22	190	90
Allement	1,9	32	225	110

1. Bassin touristique et capacités d'hébergement

L'implantation des ouvrages hydroélectriques et des réservoirs de Coiselet, Saut-Mortier et Vouglans intéresse directement vingt communes du Pays des lacs et de la Petite Montagne, dans le Jura. Le bassin touristique du lac de Vouglans regroupe ainsi les cantons d'Arinthod, Clairvaux les Lacs, Moirans-en-Montagne, Orgelet, Saint-Julien, soit une population totale de 20.850 personnes (INSEE, 1999). Les cinq cantons comprennent un total de 113 communes. Le Parc Naturel Régional du Haut-Jura englobe quant à lui le canton de Moirans-en-Montagne. L'offre globale d'hébergement est estimée à 32.350 lits dans le bassin touristique de Vouglans, soit une fois et demie la population résidente. Cette capacité représente 24% des capacités d'accueil du département (Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition du nombre de lits touristiques par catégories sur la zone du réservoir de Vouglans dans le Jura (Comité Départemental du Tourisme du Jura, 2002, 1)

Unité géographique	Camping	Chambre d'hôte	Gîte d'étape	Hébergement collectif	Hôtel	Meublés classés	Meublés NC	Résidences secondaires	Total
Pays des lacs	11909	95	20	502	190	584	107	4700	18117
Région d'Orgelet	768	22	75	528	68	77		2200	3738
Valous'Ain	735	10		418	56	47	4	2690	3960
Val-Suran Petite	90	15	20	26	18	20	17	2115	2321
Jura Sud	1026	8		158	62	86		1695	3035
Maisod	540			238	10	4		385	1177
Total Vouglans	15078	150	115	1870	404	818	128	13785	32348
Dont Chalais	4023	24		168	20	80	27	865	5207
Total Jura	26727	553	973	12797	5680	5837	7151	72420	132138

¹⁹ Les valeurs données ici correspondent aux informations contenues dans les décrets de concessions ; ce sont donc des valeurs théoriques, calculées sur le marnage maximal réglementaire. Les tranches exploitées en pratique peuvent être différentes.

2. Usages et équipements sur la retenue de Vouglans

Un arrêté préfectoral a divisé le plan d'eau en trois secteurs d'activités privilégiant la pêche en partie Nord sur la zone A (340 ha), affectant la pratique du motonautisme et du ski nautique sur le secteur B, compris entre la Cimante (amont du pont de la Pyle) et la grange du Fréniat (390 ha), et affectant la voile et les disciplines associées dans la partie Sud, zone C (860 ha). Des prescriptions particulières et des zones réservées ont également été établies pour des utilisations spécifiques comme le ski nautique ou la baignade. Aujourd'hui, en matière d'usages sur la retenue de Vouglans et ses pourtours, on recense notamment :

- La pratique de la voile et de la planche à voile ;
- La pratique du ski nautique de compétition ;
- La pratique de l'aviron et du kayak de vitesse ;
- La pratique des véhicules nautiques à moteur (VNM) ;
- La pratique des plongées subaquatiques ;
- La baignade sur les zones de Bellecin, Surchauffant, Mercantine ;
- La pêche, selon le classement « grand lac intérieur –1ère catégorie » ;
- Les croisières sur le lac ;
- La randonnée (équestre, pédestre et VTT, y compris les activités annexes de type promenade et pique-nique) ;
- La visite du barrage de Vouglans.

Au niveau des équipements, on distingue en particulier :

- Les sites de mouillage des bouées, pour l'amarrage des bateaux et la pratique de la navigation, la pêche et la plaisance (huit sites), ainsi que plusieurs pontons ;
- Le port de plaisance de la Tour du Meix, avec 270 anneaux, trois pontons, deux rampes de mise à l'eau ;
- Un embarcadère destiné à l'embarquement des bateaux à passagers ;
- Les zones de baignade surveillée de Bellecin, Surchauffant, Mercantine ;
- La base de Bellecin, base départementale de pleine nature et base nautique ;
- Des activités privées de restauration, de croisière, de location de bateaux ;
- Des circuits équestres, pédestre et VTT sur le pourtour de la retenue ;

Au niveau des projets d'équipements, on recense notamment :

- Deux projets de ports sur la retenue de Vouglans, sur les sites de la Saisse (175 anneaux) et de Mercantine (300 anneaux) ;
- L'implantation d'une unité d'hébergement touristique Côte Meynier (site de Bellecin, commune d'Orgelet), avec la création d'un village de bungalows (45 unités) et les équipements annexes (ACEIF, 1999) ;
- L'extension de la base départementale de Bellecin et l'aménagement de nouveaux équipements ;
- Les projets de développement des activités sportives, et notamment l'aviron pour lequel le réservoir de Vouglans est un centre de référence national ;
- La rénovation du gîte de Maisod géré par le département du Jura ;

- Divers projets qui seront intégrés dans un futur schéma départemental de développement touristique, notamment en matière de restauration et d'hébergement, car le déficit local est marqué dans les matières.

Tableau 3 : Bilan des investissements liés aux projets d'équipement sur Vouglans

Equipements	Investissements
Projets de ports (La Saisse et La Mercantine)	2160 k€
Unité d'hébergement touristique (côte Meynier)	1400 k€
Extension base départementale de Bellecin	7200 k€
Développement des activités sportives	70 k€
Rénovation gîte de Maisod	1500 k€
Total	12330 k€

3. Repères sur la fréquentation touristique du site

3.1. Fréquentation générale (Direction Départementale de l'Equipement du Jura, 2002)

- La fréquentation du site s'apparente à celle d'un site balnéaire plutôt qu'à celle d'un lieu de tourisme vert. Fortement axée sur les activités nautiques ou de plage, la fréquentation est concentrée sur les mois de juillet/août ;
- Les visiteurs de proximité représentent une part dominante de la clientèle, mais cette part varie fortement en fonction de la période : de 86% un dimanche de moyenne saison à 52% en semaine de haute saison. Dans cette dernière période, les visiteurs étrangers représentent jusqu'à un visiteur sur cinq (néerlandais principalement) contre un sur dix en moyenne saison ;
- La fréquentation connaît des hausses sensibles lors des week-ends de moyenne saison lorsque la météo est favorable. L'activité touristique reste cependant fragilisée par les impacts de la météo qui entraînent de fortes fluctuations dans la fréquentation ;
- La plage constitue le principal pôle d'attrait du lac, dès les premiers beaux jours, et les activités pratiquées par les visiteurs du site sont avant tout terrestres : plage, pique-nique, promenade. Viennent ensuite les activités pratiquées sur l'eau : promenade en bateau et pêche ;
- Les taux d'occupation de la capacité d'hébergement des quatre principaux accès au plan d'eau sont maximums sur la première quinzaine d'août. Les bungalows de Surchauffant atteignent un taux de réservation de 100% pour presque tout l'été et l'hébergement de la base de Bellecin est occupé de façon optimale ;
- La fréquentation journalière en nombre de visiteurs par type de journée (avec météo favorable) est la suivante (pour les quatre principaux points d'accès : Bellecin, Pont de Poitte, Surchauffant et Mercantine) :

- un samedi de moyenne saison (mai, juin) :	3315 visiteurs ;
- un dimanche en moyenne saison :	5205 visiteurs ;
- un samedi en haute saison (juillet, août) :	4625 visiteurs ;
- un dimanche en haute saison :	9810 visiteurs ;
- un jour de semaine en haute saison :	4045 visiteurs.

- L'ouverture de la pêche et les activités de la base nautique de Bellecin marquent l'ouverture et la fermeture de la fréquentation du plan d'eau, entre début avril et fin octobre ;
- La navigation motorisée domine largement les autres modes de navigation, avec 72% des navigants ;

3.2. Fréquentation des plages

En ce qui concerne la fréquentation des plages, la Régie de Chalain a fait conduire une étude sur la fréquentation des plages surveillées de Vouglans pendant les mois de juillet et août 2000, à partir des chiffres relevés par le SDIS (service départemental d'incendie et de secours). Les estimations sont les suivantes (Régie de Chalain, 2001) :

- Sur la période considérée, les plages ont accueilli 91.160 visiteurs, soit une moyenne de 1520/jour (chiffre à considérer comme une fourchette basse, car les conditions météorologiques de la saison ont été défavorables) ;
- Ce chiffre se décompose entre 32.010 en juillet et 59.150 en août ;
- Les records d'affluence se situent le 13 août, le 25 et le 26 août pour Surchauffant (2.000 personnes), le 13 août pour Bellecin (2.000 personnes) et Mercantine (2.500 personnes).

4. Indicateurs économiques

4.1. Equipements du Département

Le Département du Jura est propriétaire des équipements de la **base nautique départementale de Bellecin**, établie sur le domaine public fluvial et le domaine public concédé de la chute de Vouglans, sur 121 ha du territoire de la commune d'Orgelet. La base nautique est un centre agréé par l'éducation nationale. Elle est ouverte au public d'avril à novembre. Outre les équipements de la base nautique, le site de Bellecin dispose de deux bâtiments d'hébergement d'une capacité de 150 lits, et d'une plage. Les activités pratiquées concernent principalement la voile, le kayak, l'aviron, mais aussi des activités complémentaires comme l'escalade, le roller, le VTT, le tir à l'arc, le canyoning ou la spéléologie. Le public de la base nautique est constitué par des groupes scolaires et des centres de vacances, ainsi que par des utilisateurs occasionnels qui fréquentent les campings à proximité. La base de Bellecin est le centre d'entraînement des équipes de France d'aviron (cinq semaines de stage pour 40 rameurs). Les projets d'investissement sur la base nautique comprennent l'extension de ses activités, avec de nouveaux aménagements du site, et en particulier des piscines, une salle omnisports, des terrains extérieurs multisports. L'investissement total est estimé à 7,2 M€. Le chiffre d'affaires annuel de la base de Bellecin est de 765 k€ et se répartit principalement entre : (i) l'équipe de France d'aviron, (ii) les scolaires en début et fin de saison, et (iii), la clientèle utilisatrice de la base en période estivale. Cette période représente 50% du chiffre d'affaires de la base. Les emplois pérennisés sont au nombre de 6 à plein temps.

Le **site départemental du Surchauffant** s'étend sur 112 ha sur le territoire de la commune de La Tour du Meix et est géré par la régie départementale de Chalain. Il comprend le port du Meix, d'une capacité de 270 amarrages répartis sur trois pontons où s'exerce notamment une activité de motonautisme, un camping de 150 places, un village vacances de 150 lits, une plage. Le site regroupe également des activités privées : deux restaurants, deux snacks, une supérette et une boutique qui représentent environ quinze emplois permanents. Un bateau restaurant, « le Louisiane » assure des croisières sur le lac (environ 30.000 personnes par an). Le chiffre d'affaire direct généré par les activités du port, du camping et du village vacances s'élève à environ 420 k€. Les emplois pérennisés sont au nombre de 4 à plein temps pour la base du Surchauffant.

La **zone départementale de Mercantine** comprend un village vacances de 40 gîtes familiaux géré par l'association VVF : « le GîteClair de la Mercantine », sur la commune de Maisod. Ce GîteClair est classé en catégorie « 4 étoiles » par arrêté préfectoral. Il représente une capacité d'accueil de 226 personnes avec un total de 195 lits, et dispose également de locaux collectifs et d'aménagements extérieurs (sports/loisirs). Le gîte fonctionne depuis 1979 pendant les vacances de février, celles de printemps, puis en juillet/août, soit 17 semaines par an. Sur l'exercice 1999/2000, 4330 journées location ont été réalisées. Un projet d'aménagement du site a été prévu pour de nouveaux objectifs de développement. Ce projet comprend la rénovation des logements, l'aménagement des locaux collectifs, la création d'un bassin de baignade et d'équipements sportifs. Les objectifs de développement sont d'atteindre une fréquentation de 125 jours/an à 100% contre 108 jours actuellement. Le coût total de l'opération (valeur été 2002) est de 1,52 millions d'euros HT. L'exploitation du gîte génère un chiffre d'affaires annuel de 260 k€ TTC (année 2000), deux emplois permanents et trois emplois saisonniers. Les retombées économiques directes sont estimées à 180 k€/an. Les retombées économiques indirectes ont été mesurées pour le compte de VVF à 15,5 euros par jour et par personne, soit 290 k€/an pour la proche région (VVF).

4.2. La Baignade

Les zones de baignade surveillées sont au nombre de trois sur le réservoir de Vouglans et correspondent aux sites départementaux, sur les accès les plus faciles du réservoir : il s'agit des plages de Bellecin, Surchauffant, Mercantine. D'autres sites plus confidentiels (« plages sauvages ») existent également, comme la Refrèche, vers Moirans. Ces plages constituent le principal pôle d'attrait du réservoir de Vouglans et sont fréquentées de manière intensive par une clientèle locale de proximité dès les premiers week-ends de printemps lorsque la météo est favorable. Le rôle social des plages dans la vie locale est très développé. La fréquentation est maximum en été avec les touristes, entre le 15 juillet et le 15 août, où le nombre de visiteurs atteint 100.000 pour les trois sites sur les deux mois. Les plages surveillées de Vouglans, et de Chancia sur Coiselet font l'objet d'une surveillance sanitaire annuelle par les services de la DDASS qui déterminent la qualité des eaux de baignade.

Tableau 4 : qualité des eaux de baignade des plages de Vouglans (Ministère de la santé, 2002)

	Commune	Lieu	Classement de la qualité des eaux*					
			2002	2001	2000	1999	1998	1997
Plage de Chancia	Chancia	Lac de Coiselet	-	Qualité moyenne	Qualité moyenne	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité
Plage de Surchauffant	La Tour du Meix	Lac de Vouglans	-	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité
Plage de la Mercantine	Maisod	Lac de Vouglans		Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité
Plage de Bellecin	Orgelet	Lac de Vouglans		Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité	Bonne qualité

* : Bonne qualité ; qualité moyenne, momentanément polluée ou mauvaise qualité ;

** : classement provisoire

Les plages de Vouglans sont très sensibles aux variations de niveau du réservoir, et ceci se répercute de la manière suivante :

- Par la réduction de la zone de baignade surveillée en cas de baisse de niveau, car la pente du réservoir, très escarpée, n'en autorise pas le prolongement, notamment sur le site du Surchauffant. Il s'agit là d'une question de sécurité ;
- Par la réduction, l'agrandissement ou la disparition complète de la zone de plage, selon les variations du réservoir ;
- Par des variations dans le confort d'utilisation des plages (aspect visuel, cailloux sous l'eau,..), auxquelles les utilisateurs sont très sensibles.

4.3. Les Clubs sportifs

Plusieurs types d'activités sportives se sont développés sur la retenue, et notamment le motonautisme, la voile, la plongée et l'aviron. Les activités de ces associations sportives contribuent à la notoriété du site de Vouglans, développent une fréquentation sportive, et contribuent à l'économie locale, principalement d'ordre touristique. Au niveau de la notoriété, l'aviron est en bonne place, avec le centre d'accueil des équipes nationales d'aviron situé à Bellecin, le « Clairefontaine de l'aviron ». Avec l'accueil des scolaires, le nombre de pratiquants de la discipline est estimé à 1500 personnes sur Bellecin, et de nombreux projets sont envisagés : développement de l'activité aviron de la base, régates, formation de cadres, création d'un pôle éducatif aviron et création d'un aviron touristique. Les deux clubs motonautiques regroupent 215 adhérents, et développent également une activité de ski nautique (85 licenciés et environ 300 personnes sur une saison). Sur le site départemental de la Mercantine, le club de voile gère 65 bateaux de 5,5 à 9 m et un club-house de 100 m² ; Environ 300 membres viennent de Paris, Dijon ou Bourg en Bresse.

4.4. Lieux d'amarrage

Les statistiques d'amarrage sont données par la DDE, qui assure la police de l'eau sur Vouglans. Les statistiques mentionnent les amarrages autorisés en juin et juillet 2002 ainsi que la capacité totale sur chaque site :

Tableau 5 : Capacités d'amarrage sur Vouglans en 2002 (DDE, 2002, 2)

Lieux d'amarrage	Autorisés en juin/juillet 2002	Capacité totale
La Saisse	110	110
Le Gringalet	168	200
La Vourpille (Largillay)	22	50
Pont de la Pyle	83	80
La Mercantine	207	250
La Refreche	14	100
Lect	2	60
Bellecin	130	150
<i>Sous total Vouglans</i>	736	1000

Les capacités totales d'amarrage sur Vouglans sont de 1000 anneaux auxquels il faut rajouter les 275 emplacements du port du Meix. A terme, les projets de ports apporteront 115 emplacements supplémentaires par rapport aux capacités actuelles. On estime que les propriétaires d'amarrage génèrent une dépense de 18,9 € par jour par personne sur la base des enquêtes SOFRES sur les dépenses des touristes en milieu rural, hors hébergement. En considérant les seuls lieux d'amarrage, le chiffre d'affaires généré pour 1000 anneaux avec 3,5 personnes/bateau et un séjour moyen de 30 jours est d'environ 2 M€.

4.5. La pêche

La pêche représente une activité locale marquée comme l'illustre le résultat d'une enquête menée en 1999 auprès de 89 pêcheurs : plus de la moitié des pêcheurs est originaire du jura (CSP, 2001). Les origines constatées par ailleurs sont disparates, mais révèlent une prédominance des départements de l'Est de la France. 60% des pêcheurs déclarent venir pratiquer pour la journée et 24% à l'occasion de séjours de vacances. 87% des pêcheurs jurassiens pratiquent la pêche plus de 10 fois par an. La répartition des modes de pêche montre un équilibre entre la pêche à bord et depuis les berges. La majorité des pêcheurs déclare rechercher les carnassiers (brochet, perche, sandre), et secondairement les poissons blancs (gardons, ablettes). Les deux AAPPMA²⁰ qui gèrent la retenue de Vouglans ont délivré en 2001 des cartes de pêche annuelles, journalières et des cartes vacances. En 2001, il a été dénombré pour l'AAPPMA de Clairvaux : 802 cartes annuelles, 225 cartes vacances, 913 cartes journalières pour un total de 59 770 €. Pour l'AAPPMA de Moirans, 985 cartes annuelles, 116 cartes vacances, 702 cartes journalières pour un total de 65 240 €.

Sur les deux AAPPMA, le nombre de pêcheurs est donc de 3.750 au titre des cartes vendues. A ces pêcheurs s'ajoutent ceux qui ont acquitté le timbre « réciprocité fédérale », soit 5.357 adultes pour une somme de 156.170 € et 411 jeunes pour une somme de 8.145 €. Le chiffre d'affaire « pêche » lié à la retenue de Vouglans est donc estimé à un total de 290 k€/an pour une fréquentation locale de 9.520 pêcheurs. Le chiffre de fréquentation doit aussi tenir compte des pêcheurs venant d'autres départements pendant la saison estivale. La

²⁰ Association Agréée pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique

fédération de pêche du Jura estime cette fréquentation « extérieure » au même niveau que la fréquentation locale, soit 3750 pêcheurs. La fréquentation totale est donc estimée à 13.270 pêcheurs sur la retenue.

5. Bilan des indicateurs économiques

Les indicateurs de l'activité touristique sur Vouglans sont résumés dans le Tableau 6 :

	Activité économique directe	Observations
Base de Bellecin	760 k€/an	6 emplois permanents
Site du surchauffant	1125 k€/an (bateau-croisière, port, camping, village vacances, carburant, charges d'entretien des bateaux)	4 emplois pour le site départemental ; 15 emplois permanents pour les privés
Sports nautiques	75 k€/an	emploi saisonnier
Pêche	290 k€/an	
VVF Maisod	260 k€/an	2 emplois permanents et 3 saisonniers
<i>Sous total</i>	2500 k€/an	
	Activité économique indirecte	Observations
Propriétaires d'amarrage	2000 k€/an	Estimation sur la clientèle « nautisme ». 19 €/jour/pers.
VVF Maisod	290 k€/an	Clientèle « VVF ». Ratio de 15,5 €/jour/pers.
Sous total	2290 k€/an	

Une autre estimation des retombées économiques liées au tourisme peut être donnée à un niveau global, sur la base des chiffres fournis par l'observatoire du comité départemental du tourisme. Sur le périmètre du bassin touristique de Vouglans, les capacités d'hébergement, les taux d'occupation et les nuitées sont données dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Capacités d'accueil et nuitées touristiques sur le périmètre de Vouglans (CDT, 2002, 2)

Périmètre Vouglans	Capacité	Taux d'occupation	Nuitées	Sources
Camping	11055	25,8%	427828	INSEE 2001 « zone pays des lacs et petite montagne » Taux sur 5 mois d'été
Chambres d'hôtes	126	28%	12700	Enquête CDT « zone pays des lacs et petite montagne »
Gîtes d'étapes	115	20%	8280	CRT
Hébergement collectif	1702	20%	122544	CRT
Hôtel	384	54%	74650	INSEE 2001 « zone pays des lacs, vignoble et Revermont »
Meublés classés	738	25,2%	66950	Enquête CDT « zone pays des lacs et petite montagne »
Meublés NC	101	25,2%	9162	Enquête CDT « zone pays des lacs et petite montagne »
Résidences secondaires	12920	12,2%	568000	Le Monde « Argent » du 23/24 juin 2002
Total Vouglans	27141		1290114	
Rappel du total Jura	132138		7331587	

Le nombre de nuitées obtenu avec le cumul des différents types d'hébergement permet une estimation globale annuelle du chiffre d'affaire touristique sur le périmètre de Vouglans, en utilisant un ratio local de dépenses touristiques de 32 €/nuitée (CDT, 2002, 2) :

Tableau 8 : Estimation globale du CA Tourisme sur le bassin touristique de Vouglans

	Estimation globale du CA Tourisme sur le bassin touristique de Vouglans	
Dépenses directes et indirectes générées par la fréquentation touristique	41500 k€/an, soit 18% du chiffre d'affaire du tourisme du département du Jura	Estimation globale toutes activités. Source : CDT 39. Ratio de dépenses touristiques sur la Franche-Comté, région des lacs en été : 32 €/jour/pers

Conclusion

Le site de la retenue de Vouglans présente un réel potentiel pour le développement d'activités touristiques et de loisirs, avec le soutien d'une politique volontariste conduite par le Département du Jura. Les Jurassiens en profitent en premier lieu, et se sont appropriés le territoire : la baignade, la pêche, la promenade ou le nautisme sont des loisirs pratiqués par beaucoup. La retenue de Vouglans fait ainsi partie intégrante du patrimoine social et culturel de la région des Lacs. La baignade constitue le principal pôle d'attrait de la retenue en période de météo favorable, mais les visiteurs de proximité et les touristes se montrent également sensibles à la nature du paysage actuel qui présente un attrait indéniable, qualifié de « naturel » dans les enquêtes. Les activités touristiques connaissent bien sur un pic de fréquentation, et se concentrent sur les deux mois d'été, mais l'augmentation de la fréquentation de Vouglans est considérée comme possible dans les secteurs du tourisme vert et du tourisme sportif, avec notamment des capacités sous exploitées en moyenne saison. Toutes les activités touristiques ou de loisirs sont cependant sensibles aux variations de niveau du réservoir, car elles ont été historiquement conçues et développées dans un contexte de stabilité du niveau entre les cotes 426 et 428 pendant l'été, qui sont maintenues pendant la majeure partie de la saison touristique. Les estimations du chiffre d'affaire des activités touristiques et de loisirs sur la retenue représentent 18% du chiffre d'affaire du tourisme sur le département du Jura.

Liste des références

ACEIF, 1999. Aménagement du site de Bellecin : Etude de faisabilité pour l'implantation d'une unité d'hébergement touristique (document 5), septembre 1999 ;

Comité départemental du Tourisme du Jura, 2002, 1. Carte du bassin touristique du lac de Vouglans, nombre de lits touristiques par type d'hébergement et par commune, juillet 2002 ;

Comité départemental du Tourisme du Jura, 2002, 2. Rapport d'activités 2002, avril 2002 ;

CSP, 2001. Conseil supérieur de la pêche, délégation régionale de Lyon, brigade départementale du Jura/Fédération du Jura pour la pêche et la protection du milieu aquatique/ Téléos/ Associations agréées pour la pêche et la protection du milieu aquatique de Clairvaux les lacs et La Gaule Moirantine. La retenue de Vouglans, état du peuplement piscicole, campagne 1999 – 2000, novembre 2001 ;

Direction Départementale de l'Équipement du Jura, 2002, 1. Analyse de la clientèle touristique du plan d'eau de Vouglans et des capacités maximales de fréquentation sur la retenue, juillet 2002 ;

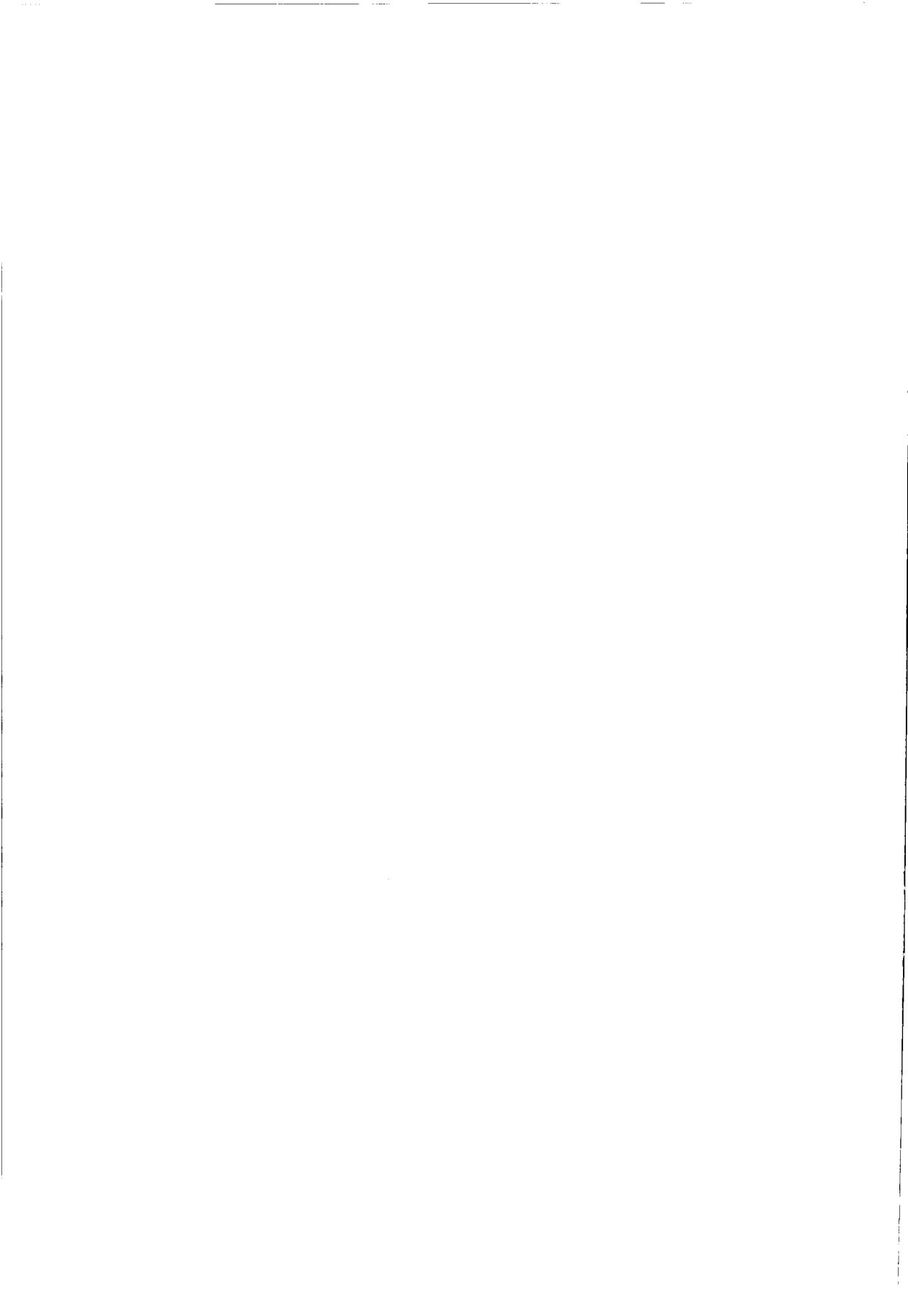
Direction Départementale de l'Équipement du Jura, 2002, 2. Subdivision de Clairvaux-les-Lacs, statistiques des droits d'amarrage, juillet 2002 ;

INSEE, 1999. Recensement de la population, 1999 ;

Ministère de la Santé, 2002. <http://baignades.sante.gouv.fr> ;

Régie de Chalain, 2001. Etude sur la fréquentation des plages du Jura pendant l'été 2000, janvier 2001 ;

VVF Vacances, sans date. Commune de Maisod, projet de rénovation des 40 logements, GîteClair La Mercantine ;



Le barrage de Serre Ponçon

Retour d'expérience socio - économique de sa construction et évolution de son exploitation multi-usages

Bernard Mahiou – Tél. 04.91.29.70.03 – bernard.mahiou@edf.fr

Martine Giuge et Dominique Roux

Électricité de France

EDF Production Méditerranée – 470 avenue du Prado – 13483 Marseille Cedex 20

Pierre Balland – Inspection Générale de l'Environnement – Ministère de l'Écologie et du Développement Durable – 144 rue Garibaldi – BP 6130 – MIGT N°10 – 69469 Lyon Cedex 06 – Tél. 04.37.24.22.56 – pierre.balland@equipement.gouv.fr

Résumé

Le barrage de Serre Ponçon est l'ouvrage clé de tout l'aménagement hydraulique à buts multiples de la Durance et du Verdon qui permet la production de 6,5 milliards de kWh d'énergie hydroélectrique renouvelable avec une puissance de 2000 MW mobilisables en 10 minutes, la fourniture d'eau potable et industrielle à toute une région et l'irrigation de 150.000 ha de terres agricoles avec une garantie de 200 millions de m³ en été. Sa construction en 1955 a entraîné un impact socio-économique très important caractérisé par la submersion de 2800 ha de terres et le déplacement de plus d'un millier d'habitants. Pourtant à l'époque, l'acceptation de cet ouvrage ne posa pas de difficultés majeures y compris parmi la population locale au motif de l'intérêt général et de l'entrée dans la modernité.

50 ans plus tard, son exploitation a été adaptée afin de satisfaire tous les usages dont l'utilisation touristique du plan d'eau, nouvel enjeu émergent à forte valeur ajoutée dans la région. La gestion de la sécheresse en 2002 a mis en exergue qu'avec de bons outils de prévisions et de simulations des conditions hydrométéorologiques, une forte solidarité des acteurs et surtout des irrigants de la Basse-Durance et une concertation approfondie, il a été possible de satisfaire l'usage touristique dans de bonnes conditions.

D'un point de vue plus global, l'équilibre des milieux aquatiques et la préservation du milieu naturel, perturbés par les aménagements hydroélectriques de la Durance, constituent à la fois une aspiration nouvelle de la société et une exigence du développement durable. Dans le cadre du contrat de rivière Durance et dans l'esprit des préconisations issues de la Mission interministérielle Durance diligentée en 2002, EDF est prête à adapter les conditions d'exploitation de Serre Ponçon et de ses autres ouvrages sur la Durance dans la recherche du meilleur équilibre entre la moindre perte énergétique de kWh hydraulique renouvelable et le gain pour le milieu. Ceci supposera une priorisation et un cofinancement des actions correspondantes par tous les partenaires associés à la réussite du contrat de rivière.

Mots clé : barrage à buts multiples, retour d'expérience, déplacement de populations, sécheresse

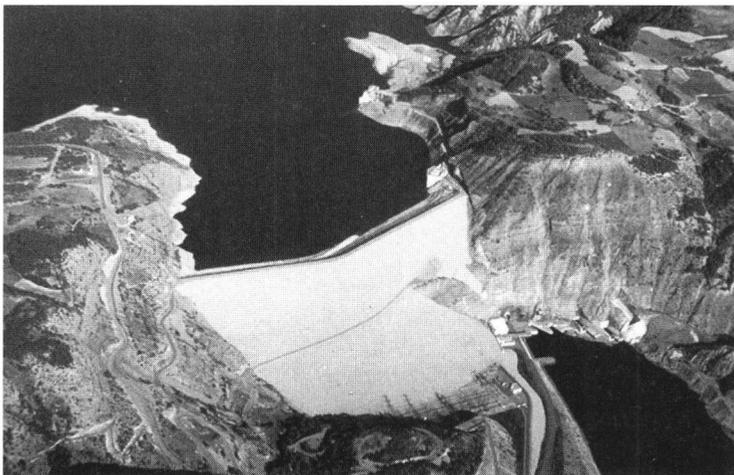
Abstract :

The Serre Ponçon dam is the key outstanding architectural structure of the multi-purpose Durance and Verdon River system which enables an output of 2000 MW within 10 minutes, supplies water for industrial and drinking purposes in Lower Provence and irrigates over 150,000 hectares of farmland with a guaranteed discharge of 200 cumecs in summer. The social and economic impact of the dam's construction in 1955 was far reaching as a result of the flooding of some 2800 hectares of land and the resettlement of over a thousand local inhabitants. At the time of its construction the means of making effective use for the Durance River system was however accepted by the local population for the benefit of a comprehensive and modern multi-purpose scheme of water management.

Half a century on, EDF reconciles electricity production with the expectations of all other partners and water users including that of tourism, a particularly active industry with high-growth potential for the regional economy. The shared management approach to 2002's drought highlighted that with high-performance forecasting and precipitation/flood simulation tools, a strong solidarity between the different actors, notably from the Lower Durance agricultural community, and a thorough and regular dialogue it was indeed perfectly possible to enjoy the nearly limitless recreational activities offered by Europe's largest man-made lake.

On a wider note, the balance of the aquatic environment and the conservation of the countryside disrupted by the different HEP stations in the Durance system make up both one of society's aims and a requirement of sustainable development. Within the framework of the Durance River Contract and compliant with recommendations of the Durance 2002 Inter Ministerial Mission, EDF is willing to adapt the operating conditions of Serre Ponçon and of its HEP plants on the Durance thus seeking the optimal balance between the lowest energy loss of renewable hydroelectric kWh and the benefit of the river's regime. This assumes a prioritisation and joint funding of the necessary actions by all parties concerned by the Durance River Contract to achieve sustainable water resource management

Keywords: Multi-purpose River system, Feedback, population resettlement, drought.



1 HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION DU BARRAGE DE SERRE PONÇON

1.1 Les premières études

Comme le Rhin, comme le Rhône, la Durance est un monument de la terre de France. La Durance est tout à la fois un grand fleuve et un torrent : un grand fleuve par son débit moyen important, 180 m³/s au pont Mirabeau, et 6000 m³/s, autant qu'une crue du Rhin en 1856 et en 1882 en ce même pont Mirabeau. En année moyenne, 2,5 de milliards de m³ passent à Serre Ponçon et 6 milliards au défilé du pont Mirabeau. A Serre Ponçon, on est à 750 m au-dessus du niveau de la mer, et au pont Mirabeau encore à 250 mètres.

Dès la réalisation du canal St-Julien à la fin du 12^{ème} siècle, les hommes tentèrent donc d'utiliser le formidable potentiel offert par la Durance. D'abord la force motrice pour actionner les moulins à huile et à grains, puis l'irrigation dont l'essor fut considérable au 16^{ème} siècle sous l'impulsion d'Adam de Craponne, enfin l'eau potable et industrielle au 19^{ème} siècle avec la réalisation du canal de Marseille. Mais ces réalisations restaient tributaires des caprices de la rivière dont les fortes crues étaient dévastatrices et les étiages souvent sévères. Il fallait en effet régulièrement reconstruire les prises d'eau ou faire face à la pénurie.

A la fin du 19^{ème} siècle, l'idée d'un grand réservoir régulateur en tête de vallée sur la Durance fait son chemin. Ce sont les services de l'Administration qui étudient le projet. L'ingénieur des Ponts et Chaussées Ivan Wilhelm participe aux travaux de l'équipe qui choisit en 1897 le site de Serre Ponçon – éperon rocheux qui se trouve sur le territoire du village de Savines – pour l'aménagement d'un grand barrage destiné tout à la fois à juguler les fortes crues de la rivière et à remédier au manque d'eau dont souffre parfois la Basse Durance.

Malgré les difficultés techniques, le projet est régulièrement remis à l'étude, en raison notamment du développement de l'exploitation industrielle de l'hydroélectricité. En 1909, une demande de concession est déposée par la Société pour la régularisation de la Durance pour la création d'un barrage au lieu-dit Serre Ponçon. Abandonné pour des raisons techniques, le projet est à nouveau relancé en 1919 par l'ingénieur Wilhelm. Douze campagnes de sondages ont lieu jusqu'en 1927, date à laquelle l'ensemble des partenaires estime qu'il n'est pas possible de contourner les difficultés techniques liées à une fondation du barrage constituée d'une couche très importante d'alluvions.

Toutefois si tous s'entendent sur l'intérêt agricole et industriel du projet, aucun n'imagine alors qu'il serait possible de provoquer la disparition du village de Savines qui occupe en partie le site de la retenue envisagée. Les travaux de l'ingénieur Wilhelm prévoient la création d'une digue de 50 m de hauteur devant retenir un lac artificiel dont la cote doit épargner le village.

1.2 Le choix du barrage

L'essor de l'hydroélectricité entre les deux guerres a incité les sociétés à reconnaître l'épaisseur des alluvions de la fondation. Repris après la guerre, les sondages permettent de définir la forme du rocher. Le sillon ou plutôt les deux sillons ont 100 m de profondeur.

Inenvisageable donc de déblayer des hauteurs et des volumes pareils, et de fonder ce qui est tenu en Europe du moins pour le vrai barrage, à savoir un ouvrage en béton. Ce doit être un barrage en remblais ou rien. On sait ce type d'ouvrage parfaitement faisable puisqu'il est déjà d'un usage courant au Etats Unis.

En 1948, EDF ouvre un concours d'idées à la suite duquel sera choisi un projet techniquement novateur avec un barrage en remblais de 120 m de hauteur fondé sur 100 m d'alluvions. Le véritable problème, quelque peu inédit et dont la solution n'est pas gagnée d'avance, est bien sûr l'étanchement convenable des alluvions. Ce traitement jusqu'à cette profondeur est à l'époque une des premières mondiales à cette échelle. Il faut pour l'entreprendre faire de grands progrès dans la technique des injections, à la fois dans la confection de coulis très fins ne décantant pas vite, dans l'utilisation de très hautes pressions d'injections, dans la technique de l'injection et de la réinjection par tranches au moyen de tubes à manchettes. Au total, ce sont 10 000 tonnes de ciment et 20 000 tonnes d'argile qui sont utilisés pour étancher et solidifier 100 000 m³ d'alluvions.

1.3 Le lien avec l'aménagement global de la Durance

Il est essentiel de garder à l'esprit que Serre Ponçon seul n'a pas de sens. C'est toute la Durance de Serre Ponçon à la mer, dont Serre Ponçon est la pièce maîtresse, qu'il faut évidemment considérer. En effet, l'intérêt de la Durance, une fois son eau stockée, réside dans la pente de la rivière, 2,7 m par km, pente assez constante qui, curieusement, se réduit peu en Basse Durance. Depuis Serre Ponçon, la Durance descend de 750 m en 280 km. C'est mieux que le Rhin descendant dans son tronçon français de 130 m en 100 km, c'est mieux que le Rhône, mais bien sûr avec des débits bien moindres. Tout de même, quand la Durance a reçu le Verdon, son débit moyen est presque de 180 m³/s et elle est encore à l'altitude 256. Elle est à la même altitude que le Rhône à Génissiat ou que le Rhin quand il entre en France, et elle n'est qu'à 50 km à vol d'oiseau de l'étang de Berre.

On voit bien là l'intérêt pour EDF de la Basse Durance, c'est-à-dire de la Durance à partir de son confluent avec le Verdon : gros débit déjà, régularisé par Serre Ponçon, et toujours forte pente utilisable.

1.4 L'impact du barrage sur le tissu socio-économique

C'est en considérant l'intérêt à long terme de toute la Durance que le choix d'un grand Serre Ponçon fut arrêté, stockant un milliard deux cents millions de m³ (plutôt que le projet initial 30 m plus bas).

Ce choix implique des conséquences économiques et sociales considérables. Les submersions provoquées par le barrage de Serre Ponçon concernent treize communes pour une surface de 2825 ha – dont 600 ha de terres cultivables - et ont un impact majeur sur les villages de Savines et Ubaye entraînant l'expropriation de plus d'un millier de personnes. De nombreux bâtiments doivent être détruits, parmi lesquels deux établissements industriels, quand 60 km de routes et chemins et quatorze km de voies ferrées doivent disparaître.

Pourtant l'aménagement n'est à aucun moment remis en cause, alors même que nombreux sont à l'époque ceux qui critiquent la politique « tout hydraulique » d'EDF. Relevant à la fois de la politique énergétique et de la politique d'aménagement du territoire, l'équipement de la Durance qui doit provoquer la disparition de deux villages est soutenu par ceux là-mêmes qui affirment vouloir lutter contre le « désert français ». Il s'agit en fait dans l'esprit de ces responsables, de favoriser le développement global de la région, d'assurer la modernisation de ces vallées, quitte à bouleverser le sort de communautés villageoises.

C'est ce que confirment les débats qu'occasionne la discussion du projet de la loi d'aménagement de la Durance. En effet, compte tenu de tous les intérêts contradictoires en jeu, il est apparu essentiel aux pouvoirs publics et à EDF que les Assemblées expriment par un vote public l'intérêt de la Nation pour cet aménagement. Tous les parlementaires s'accordent pour reconnaître l'intérêt supérieur de l'aménagement de la Durance et du barrage de Serre Ponçon, clé de voûte de ce projet d'équipement. Si quelques-uns s'inquiètent du sort des populations, aucun ne considère qu'il s'agit là d'un argument suffisant pour remettre en cause ou aménager le projet, même chez les députés dont les électeurs sont directement concernés : le rapporteur du projet n'est autre que Jean Aubin, député des Hautes-Alpes.

1.5 La loi de 1955

C'est par la loi « d'aménagement de Serre-Ponçon et de la Basse-Durance » du 5 janvier 1955, votée à la quasi-unanimité par les deux Assemblées, que l'Etat déclarait d'utilité publique l'aménagement de la Durance et en concédait la construction et l'exploitation à Electricité de France. Outre la régulation du cours d'eau, il assignait à l'aménagement deux missions essentielles : l'alimentation en eau de la Basse-Durance pour l'irrigation et l'eau potable, et l'aménagement de la force hydraulique pour la production d'énergie électrique.

Il décidait également de constituer une réserve agricole de 200 millions de m³ dans le réservoir de Serre-Ponçon afin de remédier aux insuffisances du débit naturel de la Durance en période d'irrigation intensive.

1.6 Les réactions des populations

La réalisation du barrage de Serre Ponçon ne provoque pas l'émergence de tensions au sein de la population concernée par les submersions. Le village de Savines a d'ores et déjà connu une forme nouvelle de diversification des activités par le développement d'un pôle industriel, né avec le 20^{ième} siècle et encore en activité à l'heure de la construction du barrage. La construction du barrage constitue aux yeux des responsables politiques et de la population un moyen de sortir de la crise que traverse alors le secteur industriel.

Les populations acceptent ainsi un aménagement qui sert des idéaux auxquels elles adhèrent – la modernisation de la France, le bien général et l'intérêt supérieur de la Nation – et qui ne condamne pas l'avenir qu'elles ont imaginé, que leurs élus ont conçu, dans le dessein d'assurer le mieux-être de chacun et l'accès de tous au progrès.

Le consensus qui s'organise autour du désir de modernité et de mieux-être, de la volonté d'accéder à un temps nouveau sont autant de phénomènes qui se lisent également dans le devenir des communautés après la construction du barrage. Si les populations sont majoritaires à choisir le départ, les migrations s'individualisent. A Savines, les villes du Sud-Est perdent de leur prépondérance au profit de communes plus rurales des Bouches-du-Rhône, du Vaucluse ou des Basses-Alpes. En changeant de site, ces agriculteurs quittent la paysannerie pour entrer dans le monde de l'agriculture moderne. Une rupture s'opère ainsi tant avec le lieu de vie qu'avec la période antérieure, dans un souci commun d'ascension sociale.

D'autres éléments viennent confirmer ces temps de rupture sur les lieux même de l'aménagement, prouvant que ces bouleversements ne concernent pas que les partants. A Savines, le village reconstruit sur les rives du lac de retenue est rebaptisé Savines-le-Lac. Symbole de la création d'une nouvelle commune et de l'entrée dans un temps nouveau, il se caractérise par un choix architectural résolument moderne : toits d'un seul pan, habitat collectif, jusqu'à l'église dont le plan n'est plus en croix mais en triangle. Tout est à l'œuvre dans le village reconstruit pour signifier la rupture avec le temps d'avant et l'entrée dans une nouvelle ère.

2 DESCRIPTION SUCCINCTE DE L'AMÉNAGEMENT DE LA DURANCE ET DU VERDON

Dans la suite de la construction de Serre Ponçon et mis en service de 1960 à 1976, complété en 1977 par l'aménagement du Bas-Verdon, l'aménagement de la Durance et du Verdon joue aujourd'hui pleinement son rôle. Les travaux réalisés ont permis d'utiliser un potentiel hydroélectrique important, l'équivalent de deux

tranches nucléaires mobilisables en dix minutes, de garantir l'irrigation de plus de 150 000 d'hectares agricoles et l'alimentation en eau de nombreuses communes, dont Marseille, Aix-en-Provence et le littoral varois (cf. tableau 1^{er} et figure 1 ci-après).

Ces aménagements ont permis de réaliser à l'échelle du bassin de la Durance le compromis longtemps recherché entre les impératifs de l'agriculture, de l'énergie, et du développement urbain et industriel. Ils ont été menés à bien grâce à des techniques de plus en plus élaborées, permettant la maîtrise de l'eau et son transport. Des dispositions législatives et des règlements adéquats ont, en outre, été instaurés pour régler les problèmes de répartition des eaux entre les différents usagers. Parallèlement, les grands lacs de retenue de la Durance et du Verdon ont favorisé l'essor du tourisme qui s'impose depuis plusieurs années comme un nouvel usage à prendre en considération.

Tableau 1 : Caractéristiques principales de l'aménagement Durance – Verdon

Capacité utile	Serre-Ponçon (Durance) Sainte-Croix (Verdon) Castillon (Verdon)	1030 millions de m ³ 300 millions de m ³ 113 millions de m ³
Réserves agricoles	Serre-Ponçon (Durance) Sainte-Croix (Verdon) Castillon (Verdon)	200 millions de m ³ 140 millions de m ³ 85 millions de m ³
Débit du canal EDF	En Basse-Durance	250 m ³ /s
Hydroélectricité	Nombre de centrales Puissance installée Production moyenne	21 2000 MW mobilisables en 10' 6,5 milliards de kWh par an
Irrigation et eau potable	Nombre de prises en Basse-Durance Débit dérivable en pointe à Cadarache Volume annuel prélevé en Basse-Durance Volume annuel prélevé sur le Verdon	15 114 m ³ /s garantis par la réserve agricole de Serre-Ponçon 1,65 milliards de m ³ , dont environ 250 millions de m ³ pour l'eau potable et industrielle Environ 150 millions de m ³
Périmètre irrigué	Total Basse-Durance Verdon	150 000 ha 80 000 ha 70 000 ha

Figure 1 : Carte de l'aménagement Durance Verdon



LES ENJEUX ASSOCIÉS AU BARRAGE DE SERRE PONCON

3.1 Les enjeux historiques

Véritable trait d'union entre la Provence et les Alpes du Sud qui lui apporte l'eau dont elle a besoin, l'aménagement de la Durance et du Verdon est indispensable à l'agriculture provençale, à la fourniture de l'eau potable et industrielle. Représentant 14 % de l'électricité d'origine hydraulique produite par EDF, il

constitue l'un des principaux gisements d'énergie renouvelable du parc de production et joue un rôle essentiel dans l'équilibre énergétique de la Région Provence Alpes Cote d'Azur, « péninsule électrique » qui ne produit que la moitié de sa consommation et le secours du réseau.

Dans ce contexte, l'exigence d'un partage équilibré de l'eau prend tout son sens et tout son poids. Les uns mettront en avant la loi de 1955 et les textes associés, conventions EDF/Ministère de l'Agriculture et concessions, qui ont inscrit dans le marbre le partage de l'eau entre irrigation, eau potable et hydroélectricité. D'autres feront valoir les richesses qu'ils s'estiment en droit d'attendre d'un aménagement dont le barrage de Serre Ponçon, véritable clé de voûte, occupe leur territoire. Ils ne considèrent jamais cependant que les retombées touristiques sont une compensation du prix payé par les communes riveraines à la réalisation de cet ouvrage (cf. 1.4 supra). Porteurs d'un usage émergent parfois en contradiction avec les deux premiers, ils s'attachent depuis une quinzaine d'années à lui faire acquérir une légitimité pour l'inscrire enfin dans la durée.

3.2 Le tourisme : un usage émergent de plus en plus prégnant

Le lac de Serre Ponçon est devenu progressivement un pôle d'attraction touristique majeur grâce à plusieurs atouts parmi lesquels on trouve notamment :

- un positionnement comme véritable carrefour bioclimatique entre les Alpes du Nord et du Sud ;
- le statut de plus grand barrage d'Europe : 123 m de hauteur, 600 m de longueur en crête et de largeur en pied ;
- la présence de la plus grande retenue artificielle d'Europe (en volume) : 2800 ha et 1,29 milliards de m³ ;
- de nombreuses structures d'accueil au public et la possibilité de visiter les installations EDF (avant l'interdiction relative à l'application du plan Vigipirate) ;
- 80 km de rives : rives sauvages et grands espaces dédiés aux activités de pleine nature, plages aménagées et surveillées ;
- label «Station Voile» : 7 écoles de voiles affiliées FFV, 2 sites de ski nautique, une quinzaine de bases nautiques ;
- une eau de bonne qualité dans les baignades aménagées ;
- des milieux aquatiques et paysages remarquables, intérêts halieutiques ;
- l'application de la loi littoral : Les communes riveraines du lac de Serre-Ponçon sont soumises à l'application de la Loi Littoral (du 3 janvier 1986) et en particulier à l'article L.146-6 du Code de l'urbanisme qui impose la préservation des milieux et des paysages naturels remarquables.

C'est pourquoi EDF a favorisé l'émergence d'une structure unique de valorisation des berges de la retenue. Créé le 30 mai 1997, le Syndicat mixte d'aménagement de Serre-Ponçon (SMADESEP) a signé le 12 novembre 1999 une convention avec EDF par laquelle EDF concessionnaire met à la disposition du Syndicat le terrain de la concession nécessaire "aux activités nautiques et touristiques autour de et sur la retenue de Serre-Ponçon" et le droit pour les collectivités territoriales d'édifier et d'aménager sur ces zones les équipements légers nécessaires aux activités touristiques et sportives.

Cette convention est gratuite et signée pour 10 ans. De fait, le Syndicat est compétent pour le balisage, la propreté, la surveillance du plan d'eau, l'amélioration du cadre et les études et aménagements touristiques. Il gère 2000 lits commercialisables. Son budget 2001 est de 1,22 M€ (dont 1 d'investissements) et bénéficie d'un contrat montagne pour le 12^{ième} Plan de 1,83 M€ de travaux. Il emploie 4 agents.

Une évolution récente de ce syndicat mixte a eu lieu à l'été 2003. L'Assemblée départementale du département des Hautes-Alpes vient en effet de voté une modification de ses statuts pour accroître sa compétence à toute opération de valorisation et de développement touristique. Le département s'engage par ailleurs à contribuer à hauteur de 66% de la part d'autofinancement du syndicat. Ceci traduit clairement la volonté du département que le site de Serre Ponçon fasse l'objet d'un programme de développement ambitieux.

3.3 La nécessaire conciliation des enjeux

Comment alors concilier en toute circonstance, quel que soit l'état de la ressource, alimentation en eau, production d'électricité et tourisme ? Comment faire face aux situations conflictuelles que l'exacerbation des enjeux ne manquera pas de faire naître ?

Au-delà d'une profonde culture de l'eau partagée par les Provençaux et les hauts-alpins dont chacun sait la valeur qu'il faut donner à l'eau, et du savoir-faire de gestionnaire de la ressource en eau acquis par EDF, c'est sans doute l'expérience parfois douloureuse des années sèches qui a conduit les acteurs, avec l'appui des pouvoirs publics, à construire des démarches de concertation efficaces et à se doter des outils nécessaires pour gérer la crise.

4 LES PRINCIPES DE GESTION MULTI-USAGES DU BARRAGE DE SERRE-PONCON

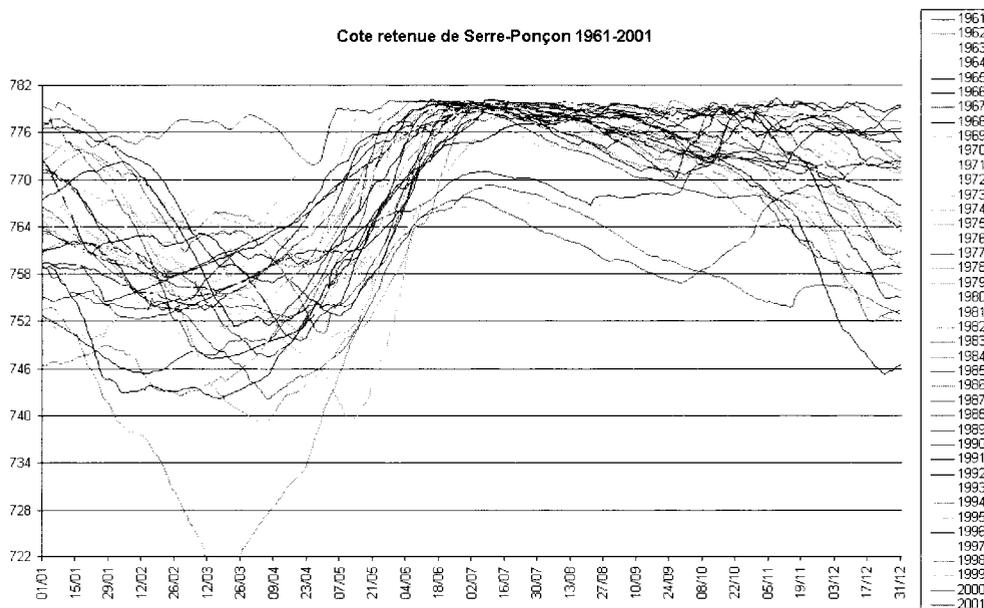
La ressource en eau procurée par la Durance est en moyenne abondante mais éminemment variable et certaines années fort mal répartie. C'est ainsi que la ressource annuelle à Cadarache varie de 3 à 8 milliards de m³. Ces chiffres illustrent à eux seuls la difficulté que rencontre le gestionnaire de l'eau pour satisfaire à chaque instant l'ensemble des usages. Il lui faut en premier lieu prévoir le mieux possible les apports. Un réseau dense de capteurs (débits, neige, pluie, température) permet, par le biais des modèles hydrologiques développés par EDF, d'évaluer le stock hydrique des bassins de la Durance et du Verdon et son évolution, ainsi que le volume des apports et les débits, affectés d'une probabilité de réalisation.

La gestion d'une retenue saisonnière comme celle de Serre-Ponçon obéit à un cycle annuel qui doit prendre en compte l'hydraulicité, les divers usages avec leurs obligations contractuelles, et les exigences environnementales. Elle doit également, tout en satisfaisant les autres usages, rechercher l'optimum économique afin de produire l'électricité au moindre coût. Elle est naturellement conditionnée par les limites physiques de l'aménagement.

Le lac est vidé pendant l'hiver où est concentrée la production d'électricité. Au printemps, les turbinages sont ajustés en fonction des apports pour reconstituer le stock énergétique hivernal et la réserve agricole, de façon à atteindre au début de l'été une cote compatible avec les activités touristiques. L'été, les turbinages permettent d'acheminer l'eau en Basse-Durance pour assurer les débits de pointe d'irrigation, ce qui se traduit le plus souvent par une baisse de niveau, compatible avec le tourisme dans la majorité des cas. Les apports d'automne complètent éventuellement le stockage et permettent de préparer la retenue pour un nouvel hiver. L'eau potable, quant à elle, est fournie régulièrement toute l'année.

Bien que l'objectif de plein remplissage et les déstockages d'été altèrent l'optimum économique qui résulterait du seul usage énergétique, les quatre usages, électricité, irrigation, eau potable et tourisme, sont compatibles sans difficulté dans la majorité des cas, environ 8 années sur 10 (cf. figure 2 ci-après). La complexité de ce mode de gestion est toutefois aggravée dans les situations extrêmes, en particulier en période de sécheresse où la ressource se fait rare. C'est ici que peuvent surgir avec une certaine acuité les conflits d'usages et que vient le temps de la concertation, voire des arbitrages.

Figure 2 : Evolution du niveau du lac de Serre Ponçon de 1961 à 2001



5. LES OUTILS DE CONCERTATION

La concertation est en partie institutionnelle, mais elle s'est également construite dans les situations de crise. Elle est en outre dynamisée par les démarches impulsées par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui invite les acteurs à se concerter pour rechercher un partage équilibré de la ressource en eau préservant le milieu.

La loi du 11 juillet 1907 décrète l'instauration d'un règlement d'administration publique destiné à prescrire les mesures à prendre pour assurer la répartition des eaux de la Durance à l'aval du pont de Mirabeau (Cadarache) et crée la Commission Exécutive de la Durance (CED) pour le faire appliquer. La CED, placée sous le contrôle du Ministère de l'Agriculture, dispose à cet effet d'un pouvoir de police. Elle exerce parfaitement ce rôle encore aujourd'hui, en partenariat étroit avec EDF. Elle est un lieu permanent d'échange d'informations, d'évaluation de la situation et d'élaboration des décisions touchant à l'agriculture, en situation normale en exerçant une veille constante, comme en situation de crise.

La concertation institutionnelle s'est transformée ces dernières années en un véritable partenariat entre la CED et EDF, complétée par le développement d'une large information des riverains de Serre-Ponçon réunis au sein du SMADESEP et des professionnels du tourisme, en lien étroit avec le Préfet des Hautes-Alpes. Par ailleurs, une communication régulière adaptée aux circonstances est faite auprès

de l'ensemble des acteurs de l'eau, du grand public et des médias. Présenter régulièrement la situation, les perspectives d'évolution et les mesures prises pour concilier au mieux les différents usages, afin de donner de la visibilité aux pouvoirs publics et aux acteurs économiques, tel est l'objet de cette information. Des conventions avec les principaux acteurs en définissent les modalités.

Progressivement, les outils de gestion prévisionnelle ont été approfondis, notamment en ce qui concerne les prévisions d'apports, l'utilisation des réserves agricoles et l'évolution de la cote de Serre-Ponçon, en phase de remplissage comme en période estivale. Adaptés, ils servent de support de communication avec les pouvoirs publics et les partenaires d'EDF.

6. COMMENT ALLER PLUS LOIN DANS LA PRISE EN COMPTE DE L'ENJEU TOURISTIQUE ?

6.1 La Mission Interministérielle d'Inspection sur la Durance

Par lettre en date du 9 juillet 2001, les Ministres chargés de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Équipement, et le Secrétaire d'État à l'Industrie mettaient en place une mission interministérielle d'inspection sur la Durance, avec pour objet d'étudier les possibilités de simplifier et d'améliorer le dispositif d'intervention de l'État sur la gestion des eaux et du lit de cette rivière, milieu structurant du bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

L'objectif du Plan d'action pour la Durance est clairement tracé : *"dépasser les intérêts sectoriels de chaque type d'usager (agriculture, tourisme, hydroélectricité, production d'eau potable, pêche, etc...) pour déterminer un équilibre à atteindre basé sur l'intérêt général"*.

Dans cette recherche d'un équilibre nouveau, l'ambition est de faire en sorte que les enjeux tels que la préservation du milieu, la protection contre les inondations, le développement du tourisme aquatique... quelque peu délaissés à l'origine, trouvent leur place sans compromettre l'équilibre économique général établi entre l'ensemble des formes d'utilisation de la ressource.

6.2 Les propositions de la Mission pour la retenue de Serre Ponçon

La Mission a pu constater qu'aucune des concessions actuelles ne mentionne l'enjeu touristique dont le statut reste précaire et révoquant. Cet enjeu s'impose néanmoins comme une exigence sociale incontournable et une richesse économique. Elle propose d'examiner la manière de reconnaître cette activité et envisage, au cas particulier de Serre Ponçon, une sous-concession d'EDF au SMADESEP approuvée par l'autorité publique et qui remplacerait l'actuelle convention. Elle donnerait au SMADESEP sur le domaine en question tous les droits et obligations d'un concessionnaire, notamment celui de créer toute

installation ou équipement. Cette proposition mérite un approfondissement juridique.

Par ailleurs, l'enjeu touristique est mal connu. Il est courant d'entendre que « la retenue de Serre Ponçon génère autant de retombées financières que les stations de ski » ou que « les retombées touristiques liées à Serre Ponçon représentent 40% du chiffre d'affaire de l'activité touristique estivale du département ». Malgré l'absence de données récentes et homogènes, la Mission avance un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 100 à 150 M€ pour le seul tourisme d'été en grande partie lié à l'eau de l'ensemble Durance/Verdon. Elle propose qu'il soit réalisé une étude « fondatrice » pour avoir du tourisme une connaissance comparable à celle des autres enjeux afférents à l'utilisation de l'eau de la retenue de Serre Ponçon. Cette étude fait actuellement largement défaut ce qui peut rendre les arbitrages difficiles. Elle incitera les acteurs du tourisme à s'organiser pour présenter des positions concertées et faciliter ainsi le dialogue. Elle devra s'intéresser à :

- l'évaluation des flux économiques actuels de l'activité loisirs tourisme (équipements, chiffre d'affaire, nuitées, emploi, selon les périodes de l'année) et l'analyse de la sensibilité de ces flux à différents scénarios de cote de retenues et de débits des rivières ;
- l'identification des points favorables à cette activité et des points de blocage liés à la gestion actuelle de l'eau (marnage, information ...) ;
- l'évaluation des "coûts/avantages" de l'aménagement agricole et hydroélectrique concernant l'activité touristique (neutralisation ou mise en valeur des sites, coûts de la précarité, dangers).

Elles visent par ailleurs à assurer une reconnaissance juridique de l'activité touristique et elles fourniront enfin des données précises sur les influences croisées de l'état des milieux et de l'activité touristique.

Sur la gestion estivale de la retenue de Serre Ponçon par EDF, la Mission invite le préfet des Hautes Alpes à demander à EDF de revoir les consignes de gestion de la cote estivale de la retenue de Serre-Ponçon sur la base d'un accès facilité aux données et en vue de tester les scénarios de gestion les moins pénalisants pour le tourisme et d'organiser la transparence autour de cette gestion.

Enfin, elle retient l'intérêt de faire jouer la complémentarité entre les deux retenues de Serre Ponçon et de Sainte-Croix du Verdon afin d'effectuer les déstockages indispensables à l'irrigation de la Basse-Durance les moins pénalisants pour le tourisme. La retenue du Verdon étant moins sensible à l'abaissement de sa cote que Serre Ponçon.

7. LA SECHERESSE 2002 : UN BON EXEMPLE DE LA GESTION MULTI-USAGES EN SITUATION DE CRISE

Le Sud-Est de la France a traversé entre octobre 2001 et juillet 2002 une sécheresse parmi les plus sévères qu'il ait connu depuis 1948. Cette sécheresse, dont le temps de retour peut être évalué à dix ans, a affecté tout particulièrement le bassin de la Durance et du Verdon. Dans ce contexte exceptionnel, tout en garantissant prioritairement la sécurité d'alimentation électrique, EDF a pris dès la fin du mois de décembre des dispositions pour assurer dans les meilleures conditions le remplissage des grandes retenues qui assurent l'alimentation en eau de la région, afin de constituer les réserves en eau nécessaires en période estivale à l'irrigation, à l'alimentation en eau potable et au tourisme autour des lacs.

Cet objectif ambitieux a été atteint grâce à la gestion prudente et volontariste d'EDF, mais également à la solidarité dont ont fait preuve les irrigants de la Basse-Durance réunis au sein de la CED pour réduire significativement leur consommation et à l'évolution favorable des conditions climatiques depuis le mois de mai. L'accent a été mis au cours de cette sécheresse sur le partage de l'information et sur la communication afin que les mesures prises soient connues et partagées par les différents acteurs.

Cette situation de crise exceptionnellement longue a permis d'expérimenter avec succès un mode de concertation beaucoup plus actif entre les principaux acteurs et d'éviter, malgré les inquiétudes légitimes suscitées par l'importance des enjeux en cause, l'émergence d'un conflit entre tourisme, hydroélectricité et agriculture, à l'image de celui qui éclata lors de la grande sécheresse des années 89/90 et marqua toutes les mémoires. EDF a par ailleurs pris en compte certaines préconisations du rapport de la Mission Durance qui avaient été évoquées lors des échanges entre les représentants d'EDF et les Inspecteurs Généraux fin 2001 et début 2002.

Contexte hydrologique et climatique

Début janvier 2002, la pluie cumulée et l'enneigement sont les plus bas observés depuis 1948. Les apports de la Durance à Serre-Ponçon depuis le 1^{er} octobre représentent alors 60 % des apports moyens et le débit entrant est inférieur ou égal aux valeurs minimales observées une année sur 10 depuis la mi-novembre. A cette situation hydrologique difficile s'ajoute une vague de froid intense sur tout le pays (jusqu'à - 6°C) qui conduit à solliciter fortement Serre-Ponçon dont la cote perd 6 m en quelques jours fin décembre.

Les prévisions d'apports au 30 juin reflètent la situation et se situent entre 40 et 60 % des valeurs normales. Elles font craindre de ne pas remplir Serre-Ponçon avec les apports ayant une chance sur 10 de ne pas être dépassés, puisque la cote au 1^{er} juillet serait dans ces conditions de 769 m, soit 7 m en dessous de la cote objectif minimale 776. Il est donc décidé d'alerter les autorités et la Commission Exécutive de la Durance, et de prendre toutes les mesures de gestion

nécessaires pour tenter de réussir le remplissage des retenues, en raison des enjeux rattachés aux usages énergétique, agricole et touristique.

Mesures prises

Tous les leviers disponibles sont utilisés par EDF et la CED, chacun dans son domaine de compétence : limitation des turbinages à la fourniture de l'alimentation en eau et à la sécurité d'alimentation électrique dès le 22 décembre, mise en état de disponibilité maximale de la centrale thermique de Martigues pour qu'elle soit en capacité de se substituer aux moyens de production hydrauliques, adaptation des cultures et réalisation d'économies d'eau par des irrigants de Basse-Durance, soutien des débits de la Durance depuis la retenue de Ste-Croix sur le Verdon début août.

Par ailleurs, des mesures d'accompagnement du tourisme à Serre-Ponçon ont été proposées par EDF pour réduire l'incidence d'un remplissage déficitaire mettant en cause la saison touristique. C'est ainsi qu'a été organisée une opération « portes ouvertes » en juillet et août en partenariat avec le Conseil Général et le SMADESEP qui a accueilli plus de 10 000 visiteurs.

Résultats

L'ensemble de ces mesures et une amélioration des conditions climatiques à partir de mai, ont permis de remplir Serre-Ponçon début juin et de maintenir la cote proche de la valeur moyenne en juillet et août (cf. figure 3 ci-après dans laquelle sont comparées plusieurs années d'exploitation de Serre Ponçon dont 2002).

Les économies d'eau réalisées par les irrigants au printemps ont été évaluées à 90 millions de m³, ce qui représente 3 m d'eau sur la cote de Serre-Ponçon et 13 % des prélèvements moyens de février à septembre. Les irrigants de Basse-Durance ont finalement soutiré 46 millions de m³ sur leur réserve agricole, pour un déstockage total de Serre-Ponçon de 96 millions de m³. La production énergétique de l'aménagement du 1^{er} janvier au 31 août n'a représenté que 35 % de la production moyenne de la période.

Au total, les mesures prises par EDF et les irrigants de Basse-Durance ont permis de concilier sans défaillance la production énergétique, l'alimentation en eau et le tourisme. Elles ont été suspendues fin août.

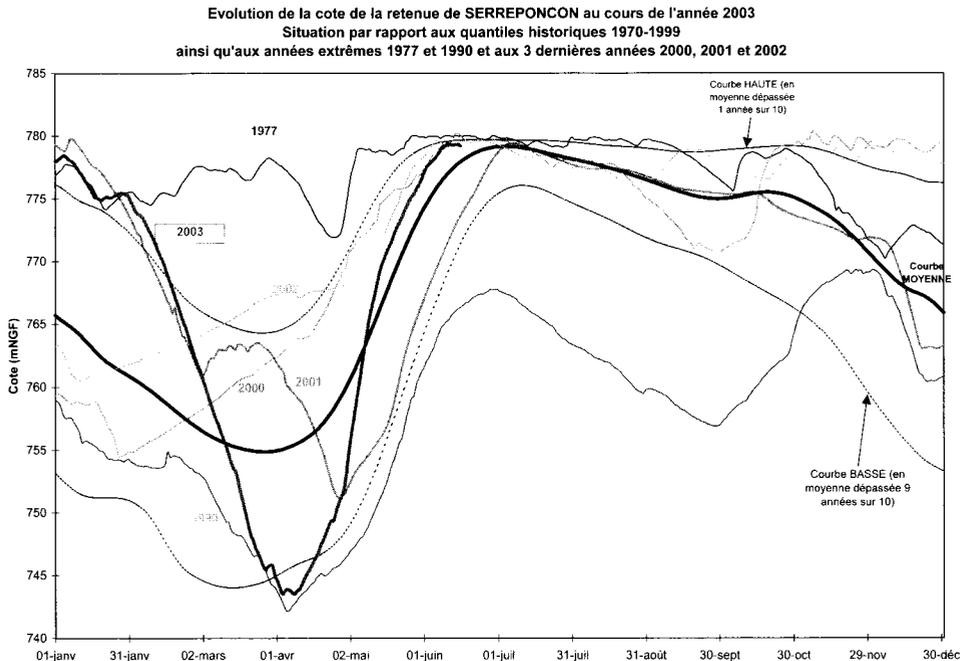
Concertation et information

Ces bons résultats n'auraient pu être obtenus sans une concertation étroite avec les pouvoirs publics et les partenaires notamment le SMADESEP, et sans une information régulière des acteurs et du public : suivi quotidien de l'évolution des paramètres avec la CED, publication hebdomadaire d'un bulletin sécheresse conjoint EDF/CED, participation aux cellules sécheresse organisées par les Préfets, mise à disposition des données, multiplication des formes d'information (information des riverains de Serre-Ponçon, courriers aux acteurs de l'eau, communiqués de presse ...).

Les attentes et les questions qui se posent

En droite ligne des propositions des Inspecteurs de la Mission, les conditions d'une garantie accrue de l'usage touristique et sa dimension économique se sont trouvées au cœur des débats. Quel taux de défaillance serait-il admissible, et à quel prix pour les différents acteurs ? Une contribution des professionnels du tourisme et des collectivités à l'effort consenti par les irrigants et EDF est-elle souhaitable et, dans l'affirmative, sous quelle forme ? Ces questions légitimes ne devront pas rester indéfiniment sans réponse pour que la solidarité de l'aval s'exerce durablement.

Figure 3



8. ET DEMAIN ?

La gestion du barrage de Serre Ponçon a acquis aujourd'hui une certaine maturité et témoigne, comme l'ont démontré les expériences récentes de 2002 et 2003, d'une réelle volonté des acteurs de se montrer solidaires dans les situations les plus critiques à la grande satisfaction des professionnels du tourisme concernés par la retenue. Pour autant, rien n'est figé à l'heure où l'on assiste à une montée forte des exigences environnementales.

La Mission d'Inspection Interministérielle « Durance » reconnaît que les objectifs initiaux assignés à l'aménagement de la Durance ont été atteints ce qui a permis le développement économique de la région et constitue une source de richesse

essentielle pour l'ensemble du pays. Les chiffres d'affaires induits sont estimés par la mission à 325 M€ pour l'hydroélectricité et à 950 M€ pour l'agriculture.

Mais la Mission pointe que, force est de reconnaître que ces aménagements ont profondément perturbé le milieu naturel et que trois préoccupations nouvelles ignorées de la loi de 1955 ont vu le jour :

- l'équilibre des milieux aquatiques et la préservation du milieu naturel, gravement perturbés par les aménagements, constituent à la fois une aspiration nouvelle de la société et une exigence du développement durable ;
- l'activité touristique, à fort contenu d'emplois et créateur de valeur ajoutée, semble constituer un élément fort du développement de l'avenir économique des populations de la Haute Durance en premier lieu ; le chiffre d'affaires induit avoisinerait selon la mission 100 à 150 M€ ;
- le développement économique et urbain de l'axe durancien, et la prévention des risques naturels.

Il est de fait que la présence du grand réservoir de Serre Ponçon a induit une diminution des crues faibles et moyennes dans la vallée de la Durance ; ceci combiné aux extractions massives de graviers dans le lit a provoqué une forte réduction du transit des graviers et un déséquilibre du profil de la rivière.

D'autre part, les flux importants de limons générés à l'aval de Serre Ponçon par l'érosion des terres noires désertées par l'agriculture a conduit à un envasement important des retenues et une fixation et une végétalisation progressive du lit. Face à ces évolutions, les acteurs locaux se sont mobilisés dans le cadre d'un contrat de rivière animé par le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) dans lequel EDF est partenaire auprès de la Région, des Conseils Généraux, des Communes, des Services de l'Etat et des acteurs socio-économiques et usagers de la Durance. Des études diagnostic sur les problèmes hydrauliques morphologiques et de protection des milieux naturels ont été réalisées pour définir et mettre en œuvre un programme d'actions à conduire sur la rivière.

Les propositions de la Mission Durance viennent conforter ces actions en prônant la nécessité d'une politique globale de la Durance, qui est d'ores et déjà engagée, et ayant pour objectif essentiel la définition d'un équilibre redéfini entre tous les enjeux en cause, établis et émergents. Elle serait de nature à favoriser :

- la préservation de l'essentiel des acquis en matière d'irrigation, de production hydroélectrique et de fourniture d'eau potable ;
- la réhabilitation du milieu naturel, en termes aussi bien de fonctionnement physique (reconstitution d'un espace de liberté) que de fonctionnement écologique (recréation de diversité écologique), l'un et l'autre étroitement interdépendants ;

- l'obtention d'un haut niveau de sécurité des biens et des personnes contre le risque d'inondation, en le limitant et en en réduisant les conséquences ;
- le développement de l'activité ludique et touristique dans les zones à fort potentiel comme les berges de la retenue de Serre-Ponçon, mais aussi, si les études le confirment, le long du corridor fluvial.

En termes de méthode, la Mission propose la mise en œuvre d'une approche reposant sur la recherche d'un optimum coût/efficacité dans tous les domaines en cause. Le juste équilibre entre les objectifs évoqués ci-dessus ne saurait en effet être obtenu à tout prix, à grands renforts de subventions publiques. Elle insiste également sur la nécessité d'agir de manière progressive, pragmatique et largement concertée, sans hésiter à recourir aux études et à l'expérimentation pour valider les projets. A cet égard, la période 2003/2015 qui s'annonce doit être mise à profit pour "dessiner" le plan Durance des décennies qui suivront.

EDF est ouverte à ces propositions qui vont dans le sens de son engagement dans le développement durable sous réserve que les priorités soient bien définies et que les actions qui modifieront l'équilibre économique de la concession hydroélectrique fassent l'objet de cofinancements des acteurs intéressés à cette évolution. En particulier, le souci de trouver le meilleur équilibre entre la moindre perte énergétique de kWh hydraulique renouvelable et le gain optimum pour le milieu devra constituer la règle du jeu entre les acteurs. Ceci sera particulièrement vrai concernant le débit réservé à conserver dans la Durance lors des renouvellements des titres hydrauliques.

Dans quelles proportions la recherche d'un nouvel équilibre entre usages et milieu remettra-t-elle en cause les usages ? Par ailleurs, comment évolueront à l'avenir les besoins en eau pour l'irrigation ou l'eau potable, et les intérêts économiques d'EDF producteur d'électricité dans un marché libéralisé sous l'impulsion de l'Europe ? Quel type de développement les professionnels du tourisme souhaiteront-ils favoriser sur les berges de Serre-Ponçon ?

Enjeux économiques évolutifs, exigences environnementales nouvelles, c'est dans ce contexte incertain, propre à notre temps, que se dessine l'avenir. Forts d'une solide expérience de gestion de leurs usages, c'est avec confiance que les partenaires du bassin de la Durance, au-delà du strict périmètre du barrage de Serre Ponçon se préparent à le construire ensemble pour aller vers une « nouvelle Durance ».

Liste bibliographique

Bodon V., 2003 – *La modernité au village – Tignes, Savines, Ubaye ... La submersion de communes rurales au nom de l'intérêt général 1920 1970* – Gières, PUG, 360 p.

Gérard P., 1996 – *L'épopée hydroélectrique de l'Electricité de France* – Paris, AHEF, 680 p.

Roux D., 2003, Un exemple de gestion concertée en période de sécheresse – Le bassin de la Durance dans le Sud-Est de la France en 2002, 20^{ième} conférence régionale européenne de la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage à Montpellier, septembre 2003.

Crédits photographiques et cartographiques : EDF

Ouvrages à vocation mixte (soutien des étiages et irrigation) dans le sud-ouest de la France

Evolution des usages et modalités de financement

*Multipurpose reservoirs in South-West France
Funding dams in a context of evolving uses*

Daniel BOUBEE
(CFGB/CACG)

Henri TARDIEU
(CFGB/CACG)

Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
BP 449, 65004 Tarbes cedex
Tél. : 05-62-51-71-49
Fax : 05-62-51-71-30
E. mail : h.tardieu@cacg.fr

Résumé

Les fonctions des barrages – réservoirs se diversifient progressivement et les bénéficiaires (directs ou indirects) se multiplient. En regard, les modalités de financement du premier investissement se complexifient : on peut retenir que la répartition des premiers fonds entre un plus grand nombre de partenaires est de nature à faciliter leurs engagements. Il convient, par ailleurs, pour que cet investissement soit réalisable rapidement et "supportable", que la Collectivité l'assume totalement.

A contrario, le coût de gestion durable est supporté par l'ensemble des bénéficiaires notamment ceux qui en retirent une valorisation économique sur une longue période.

Abstract

Dam reservoir uses are currently diversifying : more and more water goes to environmental purposes. This change in stakeholders complexities project implementation. However, it could be said that a diversified and shared funding also means less funds from each donor. Moreover, it is always necessary to obtain the comprehensive funding of the first investment.

The users are charged at a price covering the "sustainable cost" of water, including long term maintenance. This level of cost recovery guarantees a sustainable service.

Mots clés : usages multiples, financement, coût durable de service

Keywords : multipurpose uses, funding, sustainable service

1. Rappel de la mission de la CACG

La CACG est la Société en charge de l'Aménagement Régional, notamment hydraulique, pour le compte de l'Etat et des diverses Collectivités Territoriales dans le quart Sud-Ouest de la France, région qui souffre naturellement de fortes irrégularités hydroclimatologiques mais à fort potentiel agricole.

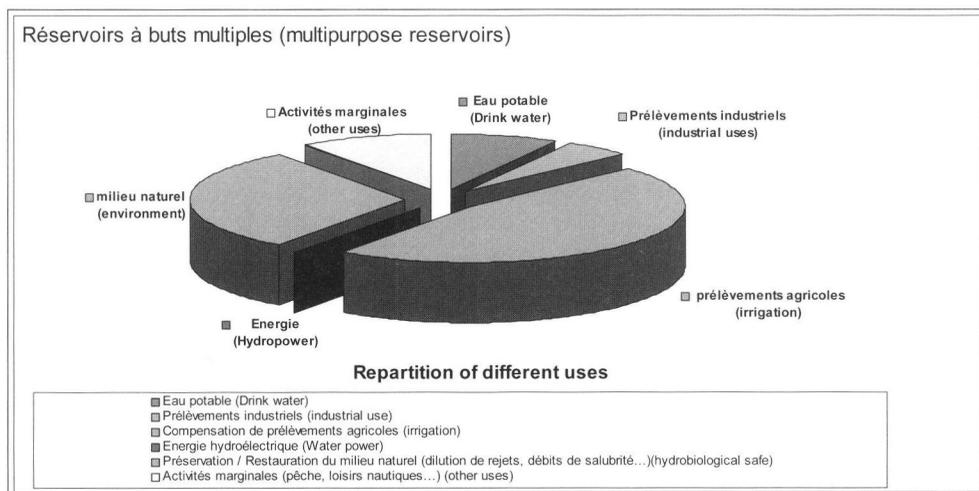
Dans ce cadre, elle a construit, maintenant depuis quarante ans, une trentaine de barrages-réservoirs (hauteur de digue supérieure à 15 m) qu'elle gère le plus souvent elle-même. Un programme presque équivalent de renforcement des volumes de ressource en eau reste encore nécessaire.

Si les premiers réservoirs créés avaient une vocation agricole essentielle pour l'irrigation des cultures d'été, les acteurs de cet aménagement conviennent maintenant de leur accorder des fonctions de plus en plus diversifiées en matière de soutien des étiages des rivières réalimentées.

2. La diversification des usages

Il convient tout d'abord de noter que ces réservoirs, qui contribuent à la régularisation des débits de plus de 2000 km de rivières, ne bénéficient jamais d'un équipement hydroélectrique permettant une valorisation énergétique directe. Très accessoirement les rivières réalimentées sont progressivement l'objet d'équipement, par des tiers privés, de microcentrales électriques, se substituant aux anciens moulins.

Figure 1 : Représentation de la diversification des usages
(nous avons ici représenté les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble du parc d'ouvrages gérés par CACG en Midi-Pyrénées et Aquitaine)



Si les prélèvements, le long des rivières réalimentées, pour des usages prioritaires (eau potable) ou économiques (agricoles et industriels) représentent encore une part prépondérante des usages, une part de plus en plus conséquente est réservée au confortement des écoulements naturels, en particulier pour assurer la salubrité des rivières par dilution des rejets résiduels urbains traités, et la garantie d'un débit « optimal » en regard des potentialités hydrobiologiques des cours d'eau. Un volume dans le réservoir est également alloué aux activités marginales (nautisme, pêche et loisirs).

Les acteurs de l'Aménagement hydraulique

En parallèle à cette diversification des usages, le jeu des acteurs s'est complexifié. Comme le montre le schéma ci-après, à un binôme initial simple [Financier (Etat) / Maître d'ouvrage (groupements d'usagers bénéficiaires)], s'est substitué un jeu évolutif de relations entre partenaires institutionnels et/ou financiers multiples.

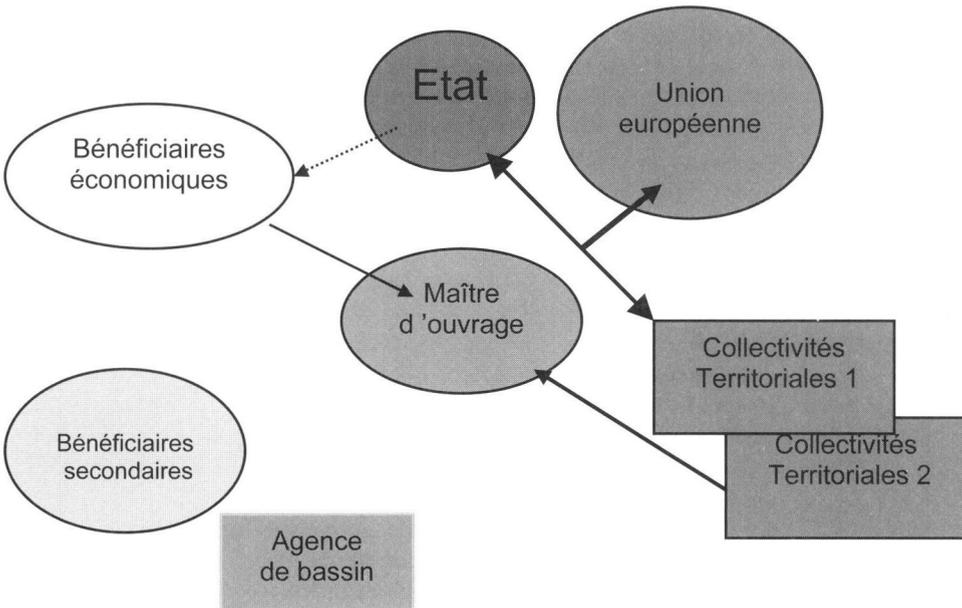


Figure 2
Représentation des divers acteurs et des relations conventionnelles les liant

3. Evolution des cofinancements

La répartition maintenant très étalée et les modalités de financement du premier investissement sont aujourd'hui tout aussi complexes en regard des usages.

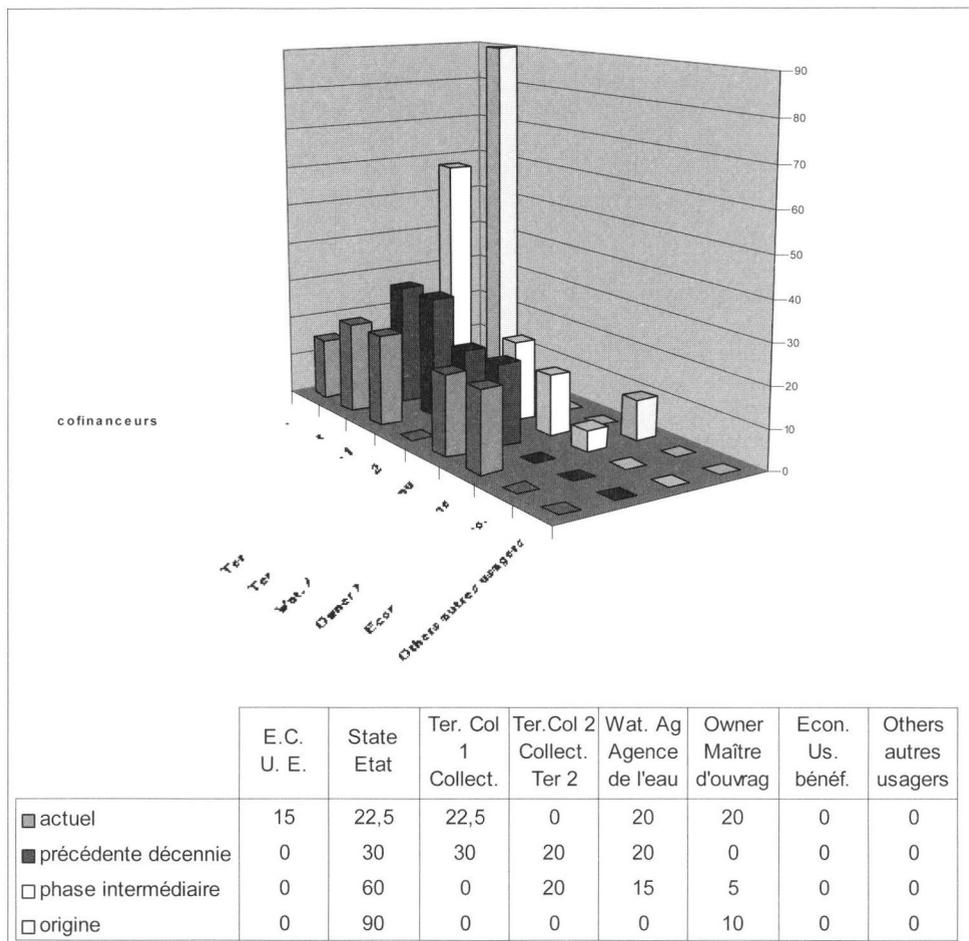


Figure 3

**Evolution de la répartition du financement du premier investissement
(les ratios présentés sur chaque période correspondent à des valeurs
calculées sur l'échantillon concerné)**

Par ailleurs, une récente obligation d'autofinancement de 20 % au moins de ce coût se traduit par un nécessaire changement de nature du Maître d'ouvrage : des Collectivités Territoriales se substituent aux groupements d'usagers. Notons que la couverture des taxes légales (TVA), sur l'ensemble de l'investissement, qui représente une charge équivalente à l'autofinancement HT, suppose pour sa récupération la continuité de la chaîne économique dans le cadre d'une gestion déléguée sur une longue période.

4. Quelle participation financière des usagers : la « tarification au coût durable »

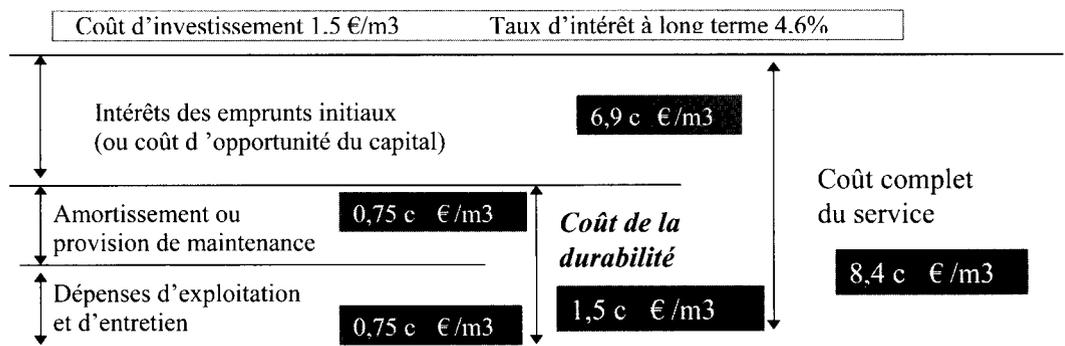
Des Maîtres d'ouvrages du Sud-Ouest ne facturent rien aux usagers. L'ensemble des coûts –investissement et fonctionnement- de soutien d'étiage sont alors supportés par des fonds publics. C'est notamment le cas des soutiens d'étiage opérés par achat d'eau à EDF. A l'inverse, nous avons monté dans le passé des projets avec des ASA qui supportent dès l'origine 20 % du coût de l'investissement en plus des coûts de fonctionnement. Compte tenu du contexte général d'acceptabilité du prix de l'eau, ces ASA ont eu du mal à recouvrer leurs factures auprès des irrigants et elles ont préféré nous abandonner leur ouvrage ...

La CACG a défini avec ses partenaires un niveau minimum de couverture des coûts par le prix de l'eau : « la tarification au coût durable ».

Le tableau ci-dessous donne un exemple moyen des montants en jeu pour une réalimentation de rivière en Gascogne.

Coût du service et durabilité

Exemple d'un barrage de réalimentation de rivière en Gascogne hors coût de distribution



Ce niveau de tarification garantit l'entrée dans le cercle vertueux d'un développement financièrement durable. Dès la fin de la phase investissement, l'aménagement ne dépend plus des fonds publics pour durer mais seulement d'un partage de la valeur économique de l'eau entre le gestionnaire et les bénéficiaires des ouvrages. Ce partage pourrait probablement aller plus loin dans le sens du gestionnaire et permettre ainsi de participer un peu à l'investissement initial mais cette démarche est difficile tant que tous les Maîtres d'ouvrages ne sont pas sur la même ligne.

5. Constats actuels

La diversification des cofinancements pour l'investissement génère des difficultés de montage administratif et financier car les exigences posées par les financeurs se complètent pour constituer un ensemble cohérent mais complexe :

- le maître d'ouvrage qui sait devoir respecter le principe de la tarification au coût durable, confirme en général la nécessité de financer le premier investissement sur fonds publics ;
- l'obligation légitime faite notamment par l'Agence de l'Eau et l'Etat de connaître précisément l'affectation des volumes, se traduit par la rédaction d'un document contractuel préalable intitulé « plan d'exploitation » ;
- les modalités de financement diverses et évolutives des financeurs, notamment des collectivités soumises aux aléas de la conjoncture budgétaire, fragilisent le montage du plan de financement ;
- ces difficultés et ces complexités rendent difficile l'émergence du maître d'ouvrage porteur du projet. A ce titre, le rôle de la CACG en tant qu'opérateur compétent pour le territoire permet souvent de mieux s'accommoder des contraintes en donnant plus de robustesse aux montages financiers et institutionnels.

En revanche, cette nouvelle complexité est garante d'une prise en charge partagée de l'effort de structuration du territoire qui allège la part de chacun. Elle est aussi garante d'une plus large prise en compte de tous les intérêts autour du projet, gage d'une meilleure qualité globale de l'aménagement. Enfin, la « tarification au coût durable », qui permet l'acceptabilité du projet par tous les acteurs impliqués, est la garantie d'un aménagement financièrement durable.

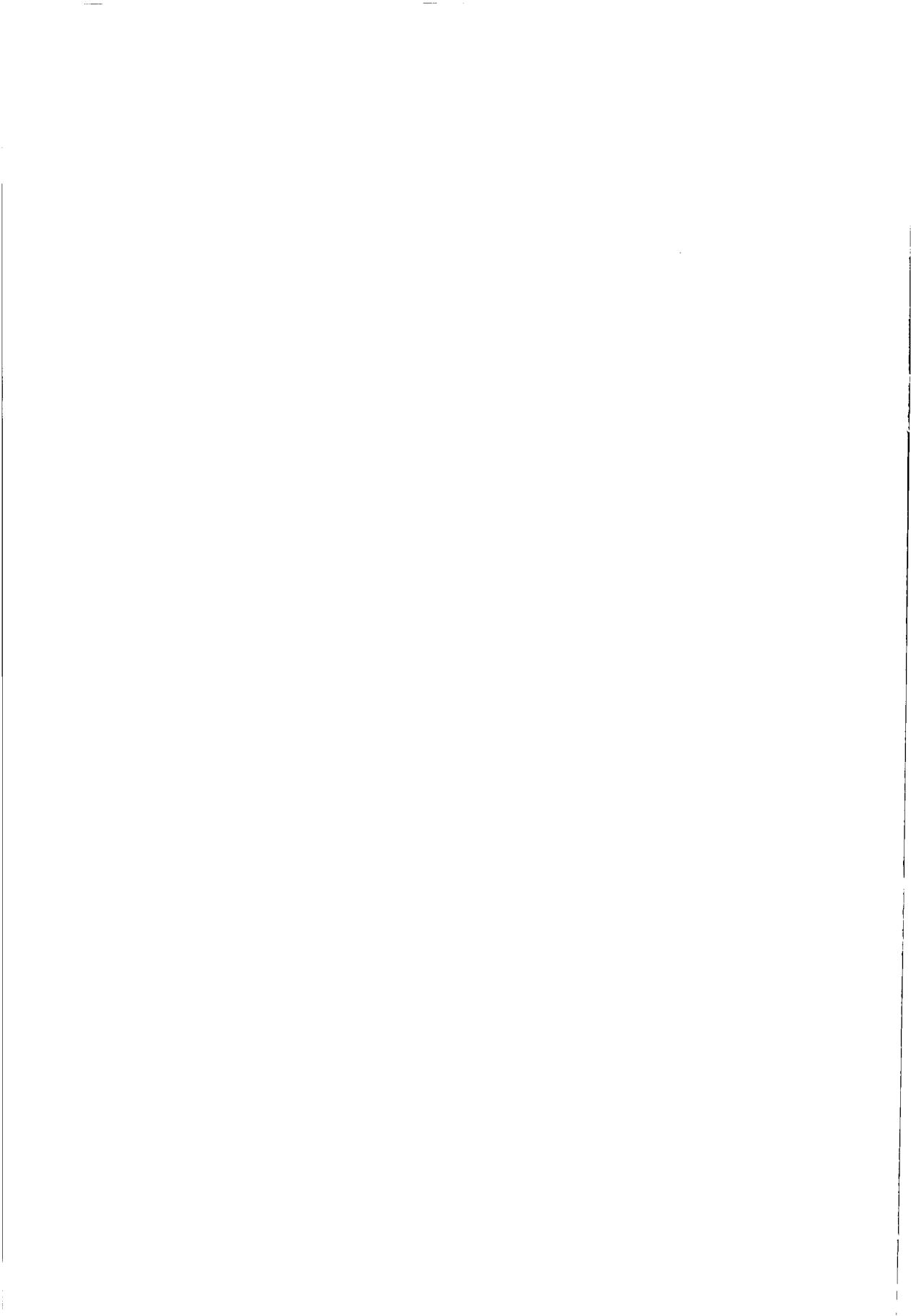
6. Conclusions et perspectives

Les programmes, initiés dans le cadre des PGE -Plan de Gestion des Eaux-réalisés en application du SDAGE Adour-Garonne, sont ainsi relancés avec des chances d'aboutir en dépit des contestations de principe de groupes de pression se faisant vocation de l'opposition à toute construction de barrage. Ainsi, sur notre territoire d'intervention, ce sont une demi-douzaine de nouveaux ouvrages qui, après mise en œuvre des nombreuses procédures de consultation du public sanctionnées par les autorisations de l'état, sont en cours de construction. D'autres projets sont à l'étude ou en cours d'instruction à la demande des acteurs du bassin, demande qui semble encore renforcée à l'issue de la présente période de sécheresse.

En conclusion, nous insisterons tout particulièrement, sur l'importance de la complète prise en compte des charges d'exploitation et de maintenance (O&M) par l'ensemble des bénéficiaires directs qui supportent seuls le coût durable des aménagements dont le premier investissement est financé par la Collectivité. Cette charge comprend notamment la mobilisation de provisions financières, constituées sur une longue période, pour garantir à tout moment de la durée de vie de l'aménagement qu'il rendra le service pour lequel il a été conçu. Ce principe est essentiel pour l'équilibre financier du compte d'exploitation du gestionnaire ainsi que pour sécuriser les décideurs.

Session 3

Les impacts sur les milieux physiques et biologiques



La vidange du barrage de Kerne Uhel sur le Blavet : impact sur le milieu (Côtes d'Armor, France)

Emptying of Kerne Uhel reservoir on the River Blavet: Environmental Impact (Côtes d'Armor, France)

Alain Jigorel

INSA de Rennes, GRGC – Equipe Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, Département Génie Civil, 20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 14315, 35043 RENNES CEDEX.

Tél : 02.23.23.83.12

Fax : 02.23.23.83.11

Email : Alain.Jigorel@insa-rennes.fr

Jean Pierre MORIN

Conseil Général des Côtes d'Armor

Direction de l'Agriculture et de l'Environnement (DAE)

2 rue Kuster - B.P. 2375

22023 SAINT BRIEUC CEDEX 1

Tél : 02.96.62.27.07

Fax : 02.96.62.27.28

Email : MORINjeanpierre@cg22.fr

Résumé

La création d'une retenue, par le barrage d'une rivière, modifie les paramètres physico-chimiques et biologiques de la retenue elle-même et de la rivière en aval. Cet impact est amplifié lorsque les teneurs en nutriments des eaux sont excessives, car la retenue subit alors un processus intense d'eutrophisation qui est à l'origine de nombreux dysfonctionnements internes : variations de pH, désoxygénation, prolifération de cyanobactéries, relargage de métaux, sédimentation biogène importante ($1,5$ à 5 cm.an^{-1})... Dans les retenues départementales des Côtes d'Armor la qualité du milieu est partiellement restaurée par la mise en œuvre de mesures curatives : oxygénation artificielle et contrôle du développement algal.

Dans tous les cas, la vidange constitue un risque important pour la rivière en aval du barrage. Le protocole appliqué pour la retenue de Kerne Uhel sur le Blavet a permis de maintenir la production d'eau potable pendant la vidange et de préserver la rivière en aval.

Abstract

The creation of a reservoir, by damming a river, modifies the physical and biological parameters of both the reservoir and river downstream. This impact is amplified when the nutrient concentration is excessive, because the reservoir then undergoes an intense process of eutrophication which is the origin of numerous internal problems : variations of pH, deoxygenation, proliferation of cyanobacteria, salting out of metals, a significant biogenic sedimentation ($1,5$ to 5 cm.y^{-1}). In reservoirs, in the department of Côtes d'Armor, the environmental quality is partially restored by curative methods : artificial oxygenation, control of algal development. In all cases, reservoir emptying constitutes a significant risk for the river downstream of the dam. The protocol applied to the Kerne Uhel reservoir, on the river Blavet, makes it possible to maintain the production of drinking water during emptying and to conserve the river downstream.

Mots clés : Barrages, sédiments biogènes, vidange, qualité du milieu.

Keywords : Dams, biogenic sediments, emptying, environmental impact.

Introduction

Le Département des Côtes d'Armor assure la gestion des trois retenues (Arguenon, Gouet, Blavet) créées pendant la période 1973-1981 pour répondre au besoin croissants d'eau potable. Ces réservoirs sont situés dans des bassins versants soumis à une agriculture intensive qui génère des flux excessifs de nutriments responsables de l'eutrophisation.

L'efficacité des mesures préventives mises en œuvre dans le bassin versant et des mesures curatives dans les retenues est dans tous les cas, évaluée grâce à un suivi régulier des paramètres physico-chimiques de l'eau des tributaires et des réservoirs. Toutes les mesures préventives appliquées jusqu'alors dans les bassins versants ont été insuffisantes pour améliorer la qualité de ces milieux aquatiques qui connaissent des dysfonctionnements importants : désoxygénation, proliférations algales, blooms de cyanobactéries, envasement accéléré, relargages à partir des sédiments... Aussi des mesures curatives ont été progressivement mises en place depuis une vingtaine d'années pour améliorer la qualité de l'eau brute. Elles concernent l'oxygénation artificielle des réservoirs par injection d'oxygène pur (Gouet, 1984) ou par aération-déstratification (Kerne Uhel sur le Blavet, 1999) et le contrôle du développement des cyanobactéries par des épandages de sulfate de cuivre.

Les traitements au sulfate de cuivre ont un impact qualitatif et quantitatif sur la sédimentation endogène (Jigorel et Bertru, 1993 ; Jigorel et al, 2000). L'oxygénation ou l'aération de la colonne d'eau limite fortement les relargages des nutriments et des métaux mais ceux-ci restent stockés dans les sédiments. L'accumulation d'éléments polluants dans la retenue, constitue un risque supplémentaire pour le milieu aquatique, lors des vidanges. Celles-ci doivent être réalisées en respectant des protocoles précis pour réduire au maximum l'impact sur la rivière en aval du barrage.

Le protocole appliqué pour la vidange de la retenue de Kerne Uhel sur le Blavet (Côtes d'Armor) a été établi à partir des observations et des expériences réalisées au cours des 20 dernières années lors des nombreuses vidanges réalisées par le Conseil Général.

1. Site et méthodes

1.1 Principales caractéristiques de la retenue

La retenue de Kerne Uhel a été créée par la construction d'un barrage en béton dans la haute vallée du Blavet. L'ouvrage est de type voûte unique cylindrique à seuil libre (figure 1).



Figure 1 : Le barrage de la retenue de Kerne Uhel sur le Blavet

La capacité du réservoir est de 2,3 millions de m^3 pour une superficie correspondante de 74 ha. Sa longueur totale est de 3,5 km, sa largeur maximale n'excède pas 200 m, et sa profondeur est voisine de 10 mètres à la cote de retenue normale (220 m NGF). Sa hauteur totale est de 14 m par rapport aux fondations et sa longueur en crête est de 120 m.

Le plan d'eau comporte deux bassins secondaires qui peuvent être isolés du bassin principal en période de basses eaux. Le premier est situé en amont du CD 50, et le second dans l'anse de Rocleu (figure 2).

Cette retenue constitue une réserve destinée essentiellement à l'alimentation en eau potable (production de $18\,000\,m^3.j^{-1}$) pour la desserte du Sud-Ouest du département des Côtes d'Armor. Une micro-centrale hydroélectrique d'une puissance maximale de 210 KW produit de l'énergie en hiver. Enfin le plan d'eau constitue un lieu de loisirs notamment pour la pêche, la voile et la randonnée pédestre (sentier périphérique).

La gestion de l'ouvrage est assurée par la Direction de l'Agriculture et de l'Environnement (DAE) du Conseil Général 22.

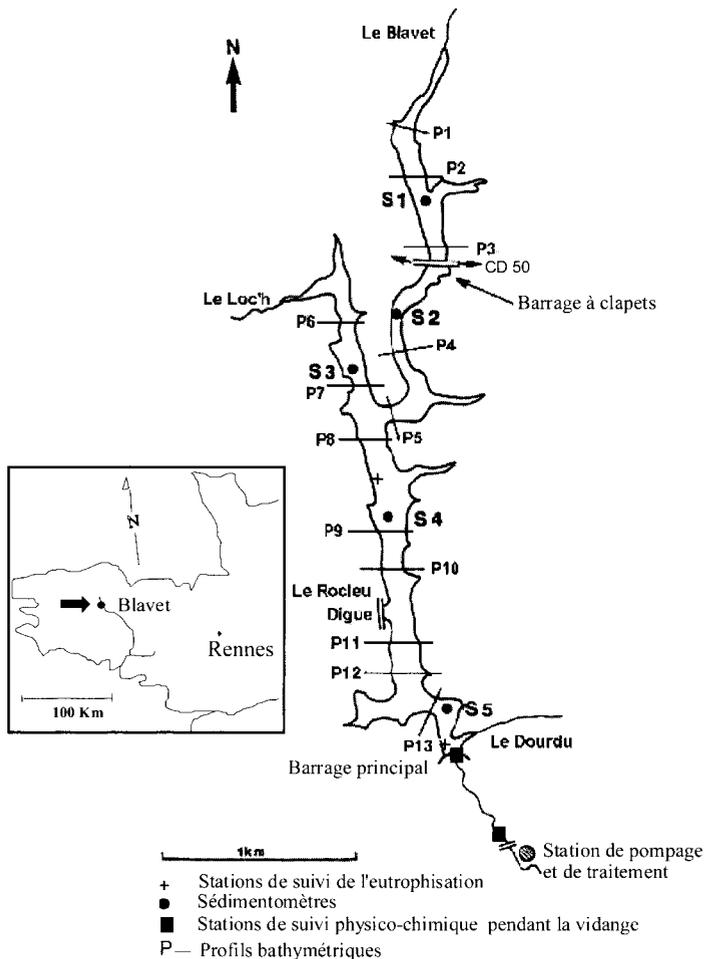


Figure 2 : La retenue de Kerne Uhel sur le Blavet : situation des stations d'étude.

1.2 Suivi de l'eutrophisation et de l'envasement de la retenue

La retenue a subi un processus d'eutrophisation dès la première année de sa mise en eau (1981) qui se traduit par des proliférations algales à la belle saison. Les populations algales, pratiquement identiques dans toutes les retenues eutrophisées de la région, sont caractérisées par une succession saisonnière : les diatomées dominantes au printemps laissent progressivement place au chlorophycées puis aux cyanobactéries qui prolifèrent surtout en été et en automne. Les cyanobactéries apparaissent par phases explosives et comportent généralement un genre nettement dominant qui peut représenter plus de 90 % des algues phytoplanctoniques.

L'eutrophisation a des effets néfastes sur le milieu : forte amplitude journalière de variation du pH, accroissement des quantités de MES qui colmatent les filtres de l'usine de fabrication de l'eau potable, désoxygénation des eaux profondes qui

favorise les relargages de nutriments et de métaux à partir des sédiments. La présence des cyanobactéries constitue un problème majeur car elles peuvent potentiellement sécréter des neurotoxines et des hépatotoxines (CESR Bretagne, 2003). En l'absence de contrôle du phénomène au niveau de la retenue, la production d'eau potable devient techniquement très difficile et plus coûteuse. La présence de toxines peut même conduire à l'arrêt de la production sur décision des autorités sanitaires.

Les suivis réalisés dans les retenues ont pour objectif de bien déceler l'apparition des dysfonctionnements liés au phénomène d'eutrophisation afin d'optimiser la mise en œuvre des mesures préventives et curatives : aération artificielle, épandages de sulfate de cuivre, restrictions des usages de l'eau. Ils sont définis en partenariat avec l'Agence de l'Eau Loire Bretagne et la DDASS des Côtes d'Armor. Ils sont mis en œuvre par le Service d'Assistance Technique au Traitement de l'Eau Potable de la DAE.

Dans la retenue de Kerne Uhel les prélèvements sont réalisés dans deux stations situées respectivement à l'amont immédiat du barrage (point A) et dans la partie médiane du réservoir (point B) selon une périodicité hebdomadaire ou bimensuelle selon les paramètres. Ils débutent généralement au mois d'avril et se terminent en octobre.

Parallèlement l'INSA de Rennes assure un suivi en continu de la sédimentation dans 5 stations (figure 2). Le relevé des sédimentomètres est effectué selon une périodicité bimestrielle. Les résultats montrent que l'eutrophisation est à l'origine de l'envasement de la retenue. Les dépôts fins de type vase sont essentiellement biogènes (matière organique et frustules de diatomées). La vitesse d'envasement de la retenue a été de 16 mm.an^{-1} pendant la période 1990-1998.

1.3 Suivi de la vidange

Les opérations de vidange périodique des retenues départementales sont réalisées sous la maîtrise d'œuvre de la DAE. La dernière vidange de la retenue de Kerne Uhel a été faite en 1998 avec la participation d'un bureau d'étude (Aquascop), du Cemagref, de l'INSA de Rennes, de la Fédération Départementale pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FDAAPPMA), de la DDAF et du CSP. Le bureau d'étude a réalisé l'étude d'incidence ainsi que le rapport de synthèse de l'opération de vidange. Le Cemagref (Aix en Provence) a apporté une assistance technique pour le contrôle et la surveillance du barrage conformément aux dispositions de la circulaire interministérielle du 14 août 1970.

Le protocole de suivi de la vidange a été établi pour évaluer au mieux les impacts de la vidange sur la rivière en aval du barrage ainsi que l'efficacité des mesures préventives mises en œuvre.

Le suivi de la qualité de l'eau a été effectué dans 5 stations situées respectivement dans la retenue, à l'aval immédiat de l'exutoire de vidange, à la Chapelle St Roch, dans deux stations du réseau de suivi départemental et enfin à l'amont d'une pisciculture (Kerauter – Ponthou). Les paramètres mesurés sont : la température, le pH, les matières en suspension (MES), les teneurs en oxygène dissous, en azote ammoniacal, en fer, en manganèse et en carbone organique total (COT). Toutes les analyses ont été effectuées par le Laboratoire Départemental d'Analyses (LDA 22) selon les protocoles des normes françaises NF ou ISO.

L'INSA de Rennes a effectué une bathymétrie pendant la vidange, afin de préciser le volume, la répartition, la nature et les caractéristiques des vases et sédiments (teneurs en cuivre et en nutriments...) accumulés depuis la mise en eau du barrage. L'impact sédimentologique de la vidange sur la rivière (Blavet amont) a aussi été évalué dans 3 stations (aval barrage, Porsporet, Chapelle St Roch). Les méthodes d'étude des sédiments ont été précisées dans des publications récentes (Jigorel et Morin, 2002 ; Jigorel et al, 2000).

2. Résultats

La vidange commencée le 29 septembre 1998 a duré 4 semaines. Elle a été effectuée dans des conditions climatiques peu favorables, caractérisées par 3 épisodes pluvieux (25 à 30 mm.j⁻¹) qui ont entraîné des remontées de la cote du plan d'eau pendant la phase terminale de la vidange partielle (figure 4a).

2.1 Impact de la vidange sur la qualité physico-chimique de l'eau

Les teneurs en oxygène dissous, ont fluctué de 8 à 12 mg.l⁻¹ à l'aval immédiat du barrage et sont donc toujours demeurées à un niveau nettement supérieur au seuil critique pour la vie aquatique. Dans la retenue elle-même, les teneurs les plus basses ont été enregistrées en début de vidange (4,8 mg.l⁻¹), puis elles ont varié de 6 à 9 mg.l⁻¹.

Les MES sont demeurées à un niveau très faible inférieur à 50 mg.l⁻¹ jusqu'au 19 octobre. Le pic maximal a atteint 350 mg.l⁻¹ le 23 octobre à l'aval immédiat du barrage. Il a résulté des remises en suspension massives à la suite de fortes pluies, de sédiments fins détritiques et biogènes dans le secteur amont exondé de la retenue. Ces MES ont décanté rapidement dans la rivière en aval du barrage comme en témoignent les valeurs nettement plus faibles à la station de St Roch à la même date (105 mg.l⁻¹).

Le flux de sédiment évacué pendant la vidange a été faible voisin de 60 tonnes pendant les 25 premiers jours. Il a augmenté de façon significative à compter du 23 octobre en raison des fortes pluies et a alors toujours été supérieur à 10 tonnes par jour jusqu'à la fin de la vidange. Les quantités totales de sédiments évacués pendant la vidange ont été évaluées à 230 tonnes (CG 22, 1999).

Les teneurs en azote ammoniacal ont connu un pic dans la retenue, lors de l'ouverture des vannes de fond, au début de la vidange. Les valeurs mesurées ensuite dans la retenue ont rarement dépassé 0,3 mg.l⁻¹. Les teneurs ont augmenté régulièrement à l'aval immédiat du barrage pendant les 15 premiers jours de vidange et ont atteint 1,2 mg.l⁻¹ le 13 octobre. Elles ont ensuite baissé régulièrement jusqu'au 19 octobre (0,6 mg.l⁻¹) pour remonter brutalement à 1,3 mg.l⁻¹ le 20 octobre pendant l'opération de récupération des poissons. Les teneurs ont ensuite chuté en deux jours, à une valeur voisine de 0,3 mg.l⁻¹ et ont peu varié pendant la phase terminale de vidange.

Les teneurs en nitrites ont augmenté légèrement dans la station aval du barrage pendant la vidange (0,1 à 0,2 mg.l⁻¹) puis ont connu un pic (0,35 mg.l⁻¹) pendant la crue du 23 octobre. Les valeurs ont toujours été inférieures, à l'exutoire du barrage, à celles mesurées dans la section aval du Blavet.

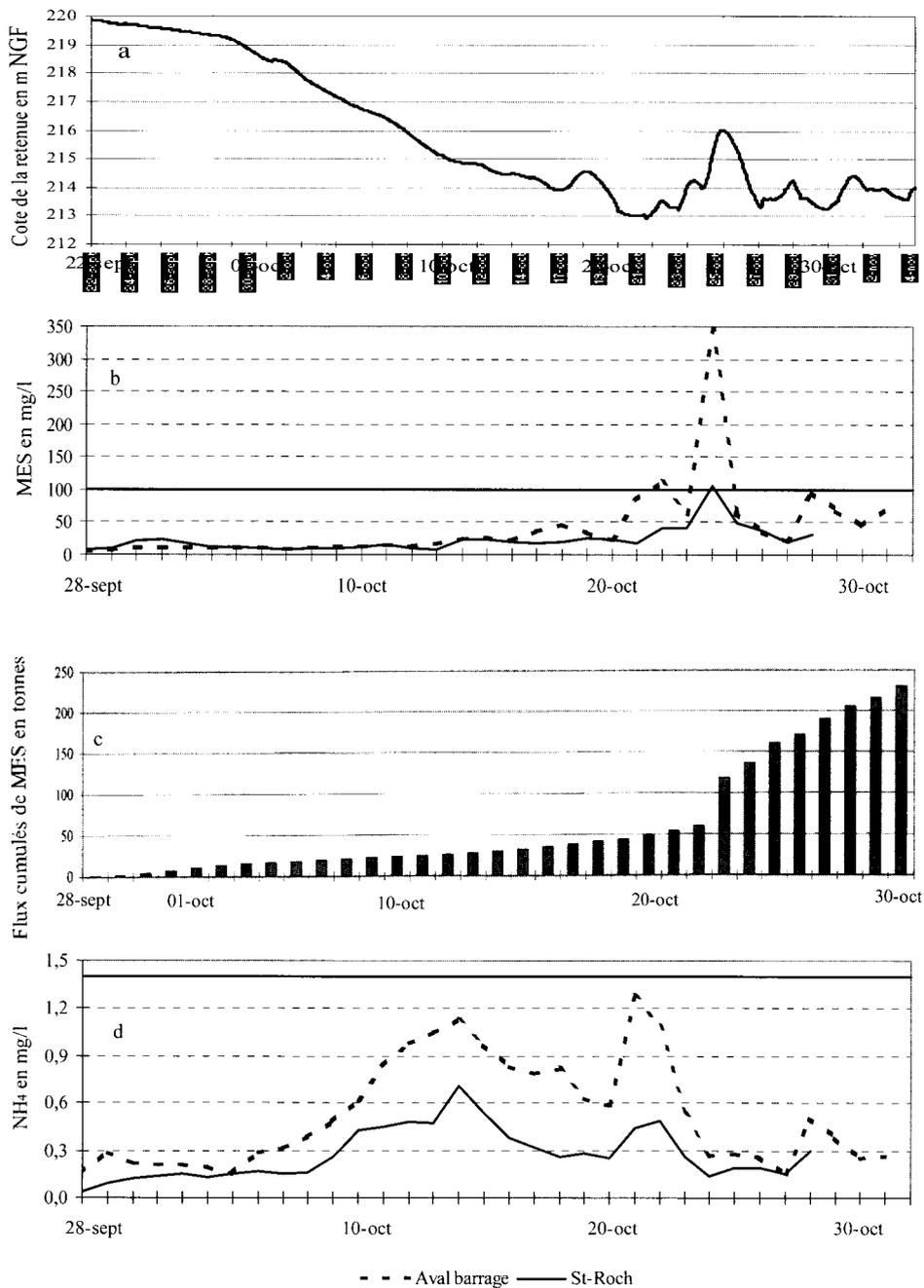


Figure 3 : Evolution des paramètres physico-chimiques pendant la vidange
 a : cote de la retenue en mètres NGF, b : matières en suspension
 c : flux cumulés de MES, d : teneurs en NH₄.
 — Teneur limite pour la production d'eau potable

Les teneurs en carbone organique total (COT) ont fluctué entre 10 et 15 mg.l⁻¹ jusqu'au 15 octobre puis ont connu deux pics le 18 (24 mg.l⁻¹) et le 24 octobre (29,2 mg.l⁻¹). Ils sont respectivement dus à l'augmentation de l'ouverture de la vanne de fond et à des fortes pluies.

Les teneurs en fer ont augmenté de façon régulière pendant la première phase de la vidange pour atteindre 4 mg.l⁻¹ le 13 octobre. Les teneurs ont connu un pic très important voisin de 10 mg en fin de vidange, pendant la crue du 23 octobre.

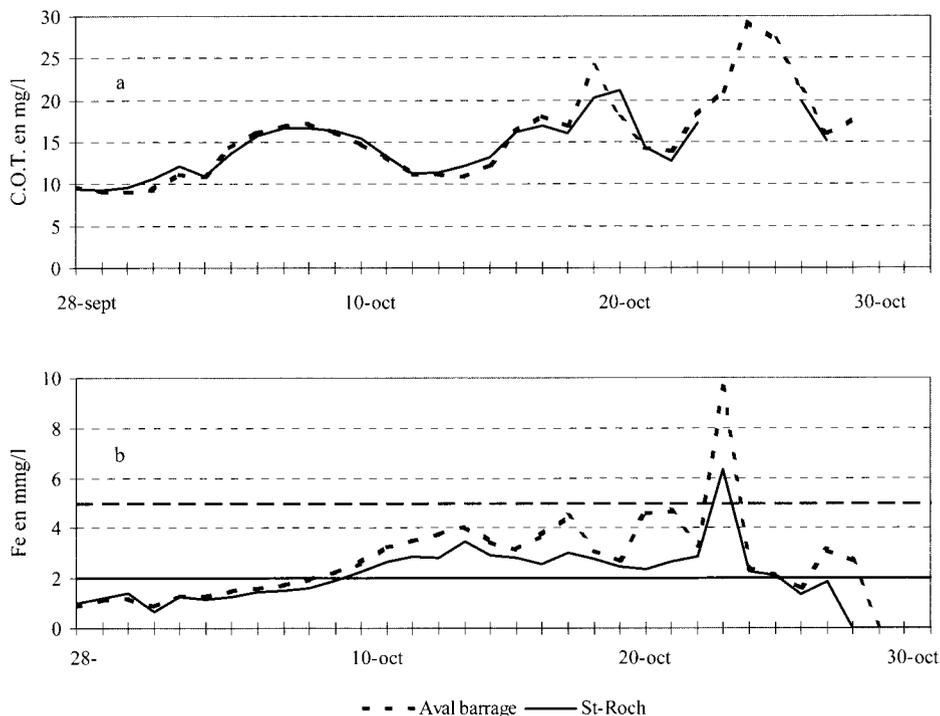


Figure 4 : Evolution des paramètres physico-chimiques pendant la vidange
a : teneurs en carbone organique total (COT), b : teneurs en Fe
— Teneur limite pour la production d'eau potable - - - Teneur limite pour la vie aquatique

2.2 Impact sédimentologique de la vidange dans la retenue et la rivière.

L'étude bathymétrique réalisée pendant la vidange a permis d'estimer le volume des vases et sédiments à 16 500 m³ dans le bassin amont et à 77 000 m³ dans la retenue elle-même dont 22 100 m³ dans le lit ennoyé des rivières (Blavet et Loc'h).

Les sédiments comportent :

- des arènes remaniées sur les pentes latérales,
- des sables grossiers accumulés sous forme de bancs à l'exutoire du Loc'h et de microdelta à l'exutoire du Dourdu,
- des sédiments fins de type vase qui recouvrent uniformément le fond de la cuvette.

Les vases ont une origine mixte détritique et biogène. Lorsque la fraction détritique est dominante, les teneurs en matière organique varient de 10 à 15 % et la densité sèche de 0,4 à 0,6. Lorsque la fraction biogène est prépondérante les teneurs en matière organique varient de 15 à 28 % et la densité sèche de 0,2 à 0,35. Les teneurs moyennes en phosphore (exprimées en P) sont de 0,14 %. Le stock total dans la retenue représente environ 50 tonnes de P.

Les résultats des mesures bathymétriques faites avant et immédiatement après la vidange montrent que les remises en suspension ont concerné 15 000 à 20 000 m³ soit 20 à 25 % de la totalité des sédiments. L'examen comparé des volumes et de la nature des sédiments dans les trois stations situées en aval du barrage, montre que la vidange n'a eu aucun impact sédimentologique décelable un an plus tard. Aucun lit de vase n'est inter stratifié dans les bancs de sables de la station de Porsporet ou dans les dépôts de méandre de la station de la Chapelle St Roch. Les volumes totaux de sédiment sont même plutôt légèrement inférieurs en septembre 1999 à ce qu'ils étaient en septembre 1998. Les analyses granulométriques de 15 échantillons représentatifs des différents faciès sédimentaires montrent par ailleurs que les sables propres qui recouvrent le fond de la rivière n'ont subi aucune pollution par des fines de type vase.

3. Discussion

Dans le massif armoricain, les vidanges des retenues sont des opérations délicates en raison de la faiblesse des débits d'étiages des tributaires et de la nature des sédiments. Les dépôts ont une origine mixte détritique et biogène et le faciès le plus abondant est la vase. Dans ce cas, la texture est fine, les teneurs en matières organiques élevées (10 à 30 %), et les densités sèches faibles le plus souvent comprises entre 0,2 et 0,4 (Jigorel et Bertru, 1993 ; Jigorel et Morin, 1994). De tels matériaux sont très sensibles à l'érosion et peuvent être massivement remis en suspension lorsque la phase d'assec coïncide avec une période de fortes pluies. Ils peuvent entraîner la destruction de la faune aquatique et colmater totalement les fonds de la rivière en aval du barrage (Merle et al, 1996). Pour éviter les dommages au milieu, il est nécessaire de bien connaître la nature et la répartition des dépôts dans la retenue afin de faire une gestion adaptée des sédiments avant et/ou pendant la vidange (Jigorel et al, 1997). Le suivi en continu de la sédimentation permet de connaître la nature des dépôts et l'évolution dans le temps des taux de sédimentation dans les différentes unités sédimentologiques (Jigorel et Morin, 2002). Il présente en outre l'intérêt d'évaluer l'impact sur l'envasement, des mesures préventives appliquées dans le bassin versant.

L'expérience acquise durant les 20 dernières années lors de la réalisation de nombreuses vidanges, a permis d'améliorer progressivement les protocoles. Les résultats montrent qu'il est toujours risqué de procéder à une vidange totale lorsque la sédimentation fine de type vase est importante. Chaque fois qu'il est possible, il est préférable de faire une vidange partielle car la décantation des remises en suspension peut se faire dans le volume d'eau résiduel de la retenue, préservant ainsi d'autant la rivière en aval.

Le choix de la période de vidange au début de l'automne est dicté par le cycle annuel de la production d'eau potable (besoins moindres en automne) et par les

conditions hydrologiques favorables (garantie de remplissage au cours de l'hiver). La colonne d'eau est homogène (déstratification) et le faible débit relatif des tributaires permet de bien contrôler l'abaissement de la retenue. A la fin de la vidange, le remplissage est généralement rapide dès le retour des pluies automnales ou hivernales.

Le niveau de la retenue est progressivement abaissé avant la vidange pour favoriser la stabilisation des berges et limiter les remises en suspension. Pendant la vidange, le débit est adapté en permanence en relation avec l'évolution des teneurs en MES. Un dispositif de rétention des vases est généralement mis en place devant la vanne de fond. Constitué d'éléments modulables il permet d'ajuster le volume résiduel de la retenue pendant la phase terminale de vidange. Chaque fois que cela est nécessaire, des seuils décanteurs destinés à piéger les sédiments sont installés à l'aval immédiat du barrage (Derville et al, 2001).

Pour éviter tout litige avec les usagers, il est nécessaire d'effectuer un suivi approprié pour évaluer l'impact de la vidange sur la qualité de l'eau et du milieu, en aval du barrage. Une étude sédimentologique est toujours réalisée dans trois stations de la rivière, avant la vidange puis au printemps suivant. Elles sont choisies dans les sites favorables au dépôt de sédiments (méandres, bancs de sables fins...). Les vidanges réalisées selon le protocole appliqué à Kerne Uhel n'ont jamais entraîné de colmatage durable du lit de la rivière.

Les procédures adaptées au domaine armoricain diffèrent sensiblement de celles préconisées pour les barrages alpins (Cardinal, 1988 ; Andrieu et al, 1997). Les rejets de MES dans la rivière doivent être maintenus à un niveau très bas, car les sédiments fins organiques de type vase peuvent provoquer une désoxygénation totale du milieu et libérer des quantités importantes de nutriments (azote et phosphore) et de micropolluants métalliques (fer et manganèse). Les teneurs maximales de MES mesurées pendant la vidange de Kerne Uhel ont été près de 100 fois inférieures à celles de vidanges classiques (Poirel et al, 1993), même lorsque les remises en suspension ont été importantes. Les apports massifs liés aux crues pendant l'assec ont décanté rapidement dans le secteur en eau et ont eu peu d'impact sur la qualité de l'eau. La production d'eau potable a pu être maintenue pendant toute la période de vidange, sauf pendant la durée des opérations de récupération des poissons (20 octobre). Les remises en suspension par les poissons sont toujours très importantes lorsque le volume d'eau est réduit (Banas, 2001). L'usine de production d'eau potable a été arrêtée uniquement pendant quelques heures et une seule mesure de MES a dépassé le seuil fixé par l'arrêt.

En conclusion, les vidanges réalisées selon des protocoles rigoureux permettent de maintenir, même dans des conditions climatiques défavorables, une qualité d'eau brute permettant la production d'eau potable. Il est impératif de gérer les sédiments fins de type vase dans la retenue elle-même pour limiter au maximum les apports dans la rivière en aval du barrage. La mise en place d'un batardeau devant les vannes de fond et de seuils décanteurs en aval du barrage permet de piéger efficacement les sédiments et de préserver la rivière.

Bibliographie

Andrieu, J.P., Cault, J.B., Bouchard, J.P., Comtet, A., Cottin, L., Garros-Berthet, H., Guillemot, B., Jigorel, A., Levenq, J., Lurin, P. et Morin, J.P., 1997 - Expérience française récente dans le domaine de la gestion des sédiments dans les réservoirs. *Actes du 19ème Congrès des Grands Barrages. Florence, Italie, 26 - 30 Mai 1997.* Q 74-R 23. p 365-383

Banas, D., 2001 - Flux de matière en étangs piscicoles extensifs : Rétention, Sédimentation, Exportation. *Thèse de Doctorat. Université de Metz. France.* 237 p

Cardinal, H., 1988 - Bilan des recherches et recommandations en matière de vidange des retenues. *Guide. Rapport EDF DER HE 31/84* 50

Conseil Economique et Social de Bretagne, 2003 – Le défi de la qualité des eaux en Bretagne. *Rapport.* 467 p

Conseil Général des Côtes d'Armor, DAE, 1999 - Vidange de la retenue de Kerne Uhel sur le Blavet. *Rapport de synthèse.* 271 p

Derville I., Bonenfant M., Royet P., Lepetit D., Jigorel A., 2001 - Retour d'expérience du démantèlement du barrage de Kernansquillec. *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires. Numéro 25.* p.13-27

Jigorel A., Derville I., Bonenfant M., Lepetit D., 1997 - Démantèlement d'un barrage comblé par des sédiments fins détritiques et biogènes : impact sur le milieu. *Actes du Symposium international de Géologie de L'Ingénieur et de l'Environnement organisé par l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur.* Athènes, Grèce, 1997. Volume 3. p. 2733-2738

Jigorel, A. et Bertru, G., 1993 - Endogenic development of sediments in a eutrophic lake. *Hydrobiologia.* 268. p 45-55

Jigorel, A. et Morin, J.P., 1994 - Bilan de la sédimentation dans un retenue eutrophisée, quinze ans après sa création. *Actes du 7^{ème} Congrès International de Géologie de l'Ingénieur, Lisbonne, Portugal, 5-9 Sept 1994.* A.A. Balkema Edition, Rotterdam. Volume IV. p 2667-2674

Jigorel, A., Morin, J.P. et Bertru, G., 1996 - Eutrophisation et sédimentation dans les retenues départementales des Côtes d'Armor, France. *Hydrologie dans les pays celtiques. Actes du 1^{er} Colloque Interceltique d'Hydrologie et de Gestion des Eaux.* Rennes, France, 8 - 11 juillet 1996. INRA Editions, Paris. 79. p 203-214

Jigorel, A., Morin, J.P. et Hébert, M., 2000 - Impact sur les sédiments des épandages de sulfates de cuivre dans les retenues. *Water in the Celtic World : managing resources for the 21st century. Proceedings of the 2nd Inter-celtic Colloquium. Aberystwyth, University of Wales, U.K., 03-07 juillet 2000. BHS Occasional Paper n°11. p 279-286*

Jigorel A., Morin J.P., 2002 – Evaluation des dépôts sédimentaires dans les retenues : mesures directes et indirectes dans le barrage de Kerne Uhel sur le Blavet (Bretagne). *Celtic Water in a European Framework : Pointing the way to quality. Proceedings of the third Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources. National University of Ireland Galway, 8 – 10 juillet 2002. p 214-222*

Merle, G., Nihouarn, A., Daligault, P., 1996 - Opérations de restauration et recolonisation naturelle sur la Sélune (Manche) après une opération de vidange de barrages. *Hydrologie dans les pays celtiques. Actes du 1^{er} Colloque Interceltique d'Hydrologie et de Gestion des Eaux. Rennes, France, 8 - 11 juillet 1996. INRA Editions, Paris. 79. p 275-282*

Poirel, A., Vindimian, E. et Garric, J., 1994 - Gestion des vidanges de réservoirs, mesures prises pour préserver l'environnement et retour d'expérience sur une soixantaine de vidanges. *18^{ème} Congrès des Grands Barrages, Commission Internationale des Grands Barrages, Q.69-R.9.Durban 1994. p 321-349*

Impacts sédimentologique et biologique de la gestion des sédiments dans le bassin maritime de la Rance

Sedimentary and biological impacts of the management of sediments in the marine basin of the Rance

Alain Jigorel

INSA de Rennes, GRGC – Equipe Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, Département Génie Civil, 20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 14315, 35043 RENNES CEDEX.

Tél : 02.23.23.83.12

Fax : 02.23.23.83.11

Email : Alain.Jigorel@insa-rennes.fr

François Lang, Dominique Melec

Association COEUR, B.P. 332, 22106 DINAN CEDEX.

Tél : 02.96.87.16.50

Fax : 02.96.87.91.11

Email : coeur@wordonline.fr

Maurice Ledrappier

EDF – CIH –

TECHNOLAC

Tél : 05.55.18.11.30

Fax : 05.55.18.13.06

Email : maurice.ledrappier@edf.fr

Résumé

L'envasement naturel de l'estuaire de la Rance est modifié par la présence de 2 barrages et par le mode de fonctionnement de l'usine marémotrice. Un marnage réduit et des durées d'étales prolongées favorisent le dépôt de sédiments fins dans les anses et dans le secteur amont de l'estuaire. Les vases recouvrent désormais les sables sur des surfaces importantes, favorisant ainsi l'uniformisation des fonds et la réduction de la diversité des biocénoses.

Les apports sédimentaires sont partiellement gérés depuis 1996 dans le site de Lyvet, selon un concept original de piégeage des sédiments dans une fosse. Le suivi réalisé montre que la méthode mise en oeuvre est très efficace et a un faible impact sur la faune benthique. La fosse constitue un nouvel habitat qui est rapidement colonisé. Le volume de sédiments piégés, après 20 mois de fonctionnement, atteint 50 000 m³ dans une fosse de 80 000 m³. Ce piège contribue à accroître la richesse spécifique du site et à restaurer le rôle fonctionnel de la vasière. Au fur et à mesure de son remplissage, les espèces nouvelles disparaissent pour laisser place au peuplement d'origine.

L'expérience menée dans le site de Lyvet montre qu'il est possible de gérer la totalité des apports dans le bassin maritime, par l'extraction des sédiments dans quelques sites à taux élevés de sédimentation (26 mm.an⁻¹).

Abstract

The natural phenomenon of siltation is changed in the Rance estuary by of the presence of two dams and the operational method of the tidal power generation plant. Reduced tidal range and the prolonged periods of slack water favour the deposit of fine sediments in

creeks and in upstream section of the estuary. Over large areas silts cover the previously existing sand deposits; this favours a uniform mud bed and a reduction in the biocenosis diversity.

The sediment input has been partially controlled since 1996 at the Lyvet site, using an original concept of a trench silt trap. Follow up studies have shown that this method is very efficient and has a minimal impact on the benthic fauna.

The trench constitutes a new habitat that is rapidly colonised. The volume of sediment trapped reached 50 000 m³ after 20 months of operation – trench volume being 80 000m³. This trap contributes to a growth in the specific richness of the site and to the restoration of the functional role of the mudflat. As the trap fills, the new species disappear leaving in their place the original population.

To maintain a natural equilibrium it is necessary to control the excess sediment input. The experiment carried out at the Lyvet site shows that it is possible to control the total input into a maritime basin by the extraction of sediments, in some sites at increased rates of sedimentation (26 mm.yr⁻¹).

Mots clés : Barrages, impacts, sédimentation, gestion, biocénoses

Keywords : Dams, impacts, sedimentation, management, biocenosis

Introduction

De nombreux estuaires sont soumis à un phénomène naturel d'envasement qui résulte notamment de la présence d'un "bouchon vaseux". Le phénomène est amplifié dans l'estuaire de la Rance par l'impact des aménagements successifs, notamment la construction de l'écluse du Châtelier au 19^{ème} siècle puis la construction du barrage de l'usine marémotrice en 1963. Ces ouvrages ont profondément modifié les paramètres hydrodynamiques et hydrosédimentaires de l'estuaire. Ils favorisent respectivement l'accumulation de sédiments fins organiques dans la Rance fluviale et de tangues dans le bassin maritime. Les qualités naturelles de ces milieux très riches ne pourront être maintenues de façon durable, sans une gestion adaptée de apports sédimentaires. Le bassin maritime connaît aujourd'hui une extension rapide de ses vasières et un comblement total de sa partie amont qui évolue vers un marais salé.

Soucieuse de l'évolution de l'estuaire et de ses conséquences économiques, sociales et culturelles, l'association CŒUR (Comité des Elus et Usagers de la Rance) avait initié dès 1995 un programme d'études et d'expérimentations visant à extraire et à valoriser les sédiments de la Rance. Les premières expérimentations notables d'extraction et de valorisation ont été effectuées en 1996 dans le cadre de la première phase (1996 – 1998) du Contrat de Baie de la Rance, sous la maîtrise d'ouvrage de EDF et la maîtrise d'œuvre de EDF - CIH. Le programme a ensuite été développé pendant la seconde phase du Contrat de Baie (1998-2003). Deux chantiers d'extraction ont été réalisés en 2000-2001 : l'un dans la Rance fluviale (plaine de Taden) et l'autre dans le bassin maritime, à l'aval immédiat de l'écluse du Châtelier.

Cet article présente les études sédimentologiques et biologiques réalisées avant et après les travaux d'extraction de 90 000 m³ de sédiments dans le site de Lyvet (bassin maritime).

1. Présentation du site et du programme d'extraction des sédiments

La construction du barrage de la Rance a permis de créer un réservoir de 184.10^6 m^3 pour une superficie correspondante de 22 km^2 à la cote + 13,50 m des cartes marines. Ce "bassin maritime" est limité au nord par l'usine marémotrice et au sud par l'écluse du Châtelier. Il a une longueur voisine de 20 km et présente une morphologie très découpée en relation avec la nature pétrographique des roches. La succession de "plaines" et de détroits résulte de la juxtaposition de micaschistes, gneiss et granulite de la série métamorphique de St Malo (Brun, 1985). L'altérabilité relative de ces roches détermine à la fois la morphologie de l'estuaire et les pentes de ses berges qui sont faibles au niveau des plaines, et très abruptes dans les détroits.

La répartition actuelle et la nature des dépôts sédimentaires sont déterminés par la morphologie du bassin maritime et par l'hydrodynamisme qui résulte du fonctionnement de l'usine marémotrice.

Les sédiments présents dans le bassin maritime comportent des matériaux détritiques grossiers, des sables et enfin des sédiments fins appelés localement marre ou marne et qui ont des caractéristiques de vases. Les dépôts détritiques grossiers, sables et graviers, sont rencontrés uniquement à l'aval de Port Saint Jean dans le secteur le plus profond de l'estuaire. Ils laissent place à des sables de plus en plus fins sur les pentes latérales. Ceux-ci sont toujours recouverts par des dépôts très fins de type vase dans les anses et dans le bras de Chateauneuf. L'examen comparé des cartes sédimentologiques établies par Ruellan (1956) et le L.C.H.F (1982) montre une extension progressive des vases. De ce fait, tout le secteur amont de l'estuaire, compris entre l'écluse du Châtelier et la plaine de Mordreuc, est comblé par des sables fins et des vases. Le chenal y est très envasé et le maintien de la navigation nécessite la réalisation périodique de dragages et de chasses hydrauliques (Bonnot-Courtois et Lafond, 1991; Bonnot-Courtois, 1993). On peut considérer que le linéaire compris entre Lyvet et Morgrève est aujourd'hui dans sa phase terminale de comblement. La vasière est colonisée par de nombreux îlots de végétation halophyte qui témoigne d'une évolution rapide vers un marais salé.

L'association CŒUR avait proposé dès 1995, dans le cadre de la préparation du Contrat de Baie, de procéder à une expérimentation de gestion des apports sédimentaires pour préserver la richesse patrimoniale et la biodiversité de ce site reconnu d'intérêt national. Le principe retenu a consisté à extraire $10\ 000 \text{ m}^3$ de sédiments fins dans le site de Lyvet pour créer une fosse destinée à piéger les apports. Le piège réalisé en 1996 a fonctionné de façon remarquable (Jigorel et Pitois, 1998). EDF a ensuite réalisé, durant la seconde phase du Contrat de Baie, une extension de la fosse pour piéger des quantités plus importantes de sédiments.

Un programme d'extraction de $90\ 000 \text{ m}^3$ de sédiments fins dans le méandre à l'aval immédiat de l'écluse du Châtelier, a été réalisé en 1999, sous la maîtrise d'ouvrage de EDF, GEH Ouest et la maîtrise d'œuvre de EDF – CIH. Le dossier de demande d'autorisation et d'enquête publique a été établi par le groupement Saunier-Techna – INSA de Rennes – Université de Rennes 1.

Les études sédimentologiques ont été réalisées par l'équipe Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement de l'INSA de Rennes. Elles avaient pour but :

- de déterminer les volumes et la répartition des sédiments,
- de connaître les principales caractéristiques des matériaux,
- d'assurer le suivi du fonctionnement du piège créé par l'extraction des vases.

Les études biologiques ont été faites par l'association CŒUR.

2. Méthodes d'étude

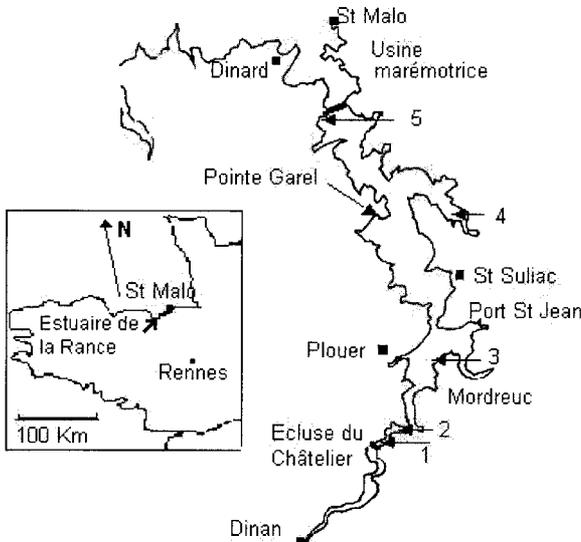


Figure 1 : L'estuaire de la Rance – Sites étudiés : 1 - Lyvet 2 - Mogrève 3 - Ville Ger 4 - Chateaufneuf 5 - La Richardais

Les épaisseurs de vases ont été mesurées sous eau dans le chenal et dans le piège par l'emploi combiné d'une sonde de profondeur et d'une perche graduée avec embout adapté. La sonde donne la hauteur d'eau tandis que le refus d'enfoncement de la perche indique la cote du fond qui correspond au platier rocheux. Les mesures à la sonde et à la perche doivent être faites en même temps car le fonctionnement de l'usine marémotrice crée dans ce site des phénomènes de seiches qui font varier le niveau du plan d'eau dans un temps très court.

Les épaisseurs de sédiments ont été déterminées par sondage à la tarière et par fonçage d'une perche graduée, dans six profils transversaux avec un point de mesure tous les 30 mètres. Les sondages à la tarière ont concerné un profil sur deux et dans chacun des sondages, les prélèvements pour analyses ont été faits en surface, à 50 cm de profondeur, à mi-hauteur et à 50 cm du fond.

Les analyses des 75 échantillons unitaires prélevés ont porté sur la granulométrie, la minéralogie, la teneur en eau, la masse volumique apparente des sédiments secs ou densité sèche.

Les analyses granulométriques ont été réalisées au granulomètre Laser Cilas 1180 après destruction de la matière organique par H_2O_2 et dispersion mécanique du sédiment dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium. La classification retenue est celle communément utilisée en sédimentologie :

Argile	: 0 - 2 μm	Sables grossiers	: 0,2 - 2 mm
Limons	: 2 - 20 μm	Graviers	: 2 - 20 mm
Sables fins	: 20 - 200 μm	Cailloux	: 20 - 200 mm

Les teneurs en matière organique ont été évaluées par dosage du carbone organique. Les teneurs en carbonates ont été déterminées par attaque à l'acide chlorhydrique à chaud et pesée différentielle. La masse volumique des vases a été déterminée au pycnomètre selon la méthode à la paraffine.

Le suivi du remplissage a comporté six séries de mesures pendant la période avril 2001 (fin des travaux de curage) mai 2003. Elles ont été faites tous les 5 mètres à partir d'un bateau déplacé le long d'une corde tendue entre les deux rives.

Les mesures des vitesses de sédimentation et/ou d'érosion des vasières sont effectuées tous les trimestres dans 5 sites qui comportent chacun 2 ou 3 stations pour tenir compte de l'hétérogénéité du milieu : morphologie de la vasière, distance au chenal de navigation, végétalisation éventuelle.

Le principe repose sur la mesure de la variation relative du niveau de la vasière à l'aide d'une barre posée sur deux supports en PVC enfoncés dans le sédiment sur une profondeur de 1 mètre. Cette méthode est comparable à celle utilisée dans les marais salés (Boumans et Day, 1993). La mesure consiste à déterminer à l'aide d'un régllet d'une précision de 0,5 mm, la longueur h au dessus de la barre horizontale, d'une tige en aluminium de 10 mm de diamètre posée sur le sédiment. Pour éviter l'enfoncement de la tige dans la vase molle, celle-ci est abaissée sur un disque en polyéthylène de 60 mm de diamètre posé sur la vase. La variation du niveau de la vasière est donnée par la moyenne des 17 mesures effectuées sur une longueur de 2 m dans chaque station.

Le suivi biologique a été effectué tous les trimestres dans trois stations situées dans la zone d'extraction des sédiments (figure 5). Dans chaque station 3 échantillons sont récoltés à l'aide d'une benne Van Veen d'une surface de 500 cm^2 . La totalité des prélèvements est tamisé à une maille carrée de 1 mm. Les individus sont identifiés et dénombrés au laboratoire. Les densités sont exprimées en nombre d'individus par mètre carré. Les biomasses sont déduites de la perte de poids par calcination au four à 550 ° C et exprimées en $g.m^{-2}$.

3. Etat initial du site de Lyvet

Le secteur étudié comprend de la rive gauche vers la rive droite :

- un secteur envasé d'une largeur de 30 mètres et situé derrière l'enrochement du chenal de navigation,
- le chenal de navigation très envasé sur ses bords latéraux mais relativement peu dans son axe central. Sa largeur est réduite à 12-15 mètres alors qu'elle était de 30 m à l'origine,

- un vaste méandre en rive droite qui forme une vasière très plane en phase terminale de comblement et parsemée de nombreux îlots de végétation halophyte,
- le piège à sédiments expérimental créé en 1996 et situé dans la partie amont de la vasière. Celui-ci est largement comblé et l'épaisseur moyenne des sédiments accumulés pendant 3 ans (juin 1996 – juin 1999) était de 2,4 m. Le volume des dépôts a été estimé à 5 000 m³.

A l'aval immédiat du piège expérimental, les épaisseurs de sédiments varient légèrement en relation avec la topographie de surface en raison de la présence de petits chenaux, mais surtout en relation avec les irrégularités du substratum rocheux formé de micaschistes. Le platier rocheux apparaît globalement incliné de la berge vers le chenal. L'épaisseur maximale des sédiments atteint 3,5 m à l'emplacement d'un ancien chenal bien visible sur les profils bathymétriques (figure 2). L'épaisseur moyenne des sédiments est de 2,8 m et leur volume total est de 75 000 m³ dans l'aire à draguer.

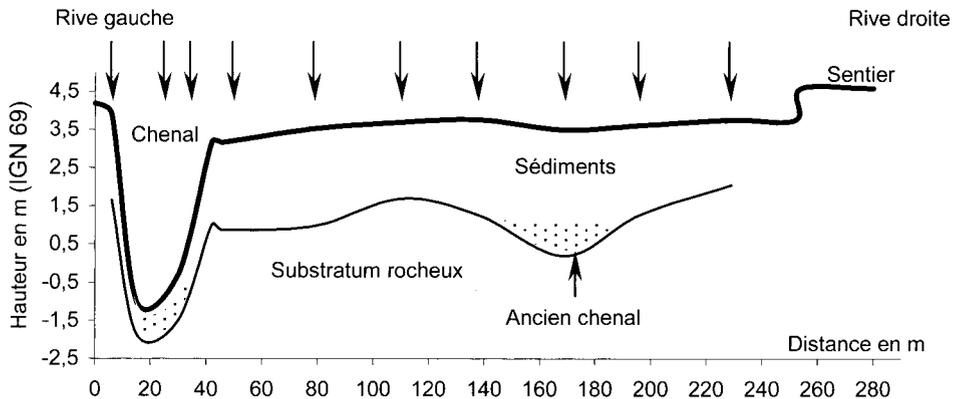


Figure 2 : Exemple de profil bathymétrique dans la vasière de Lyvet. ↓ Emplacement des sondages □ Sables moyens.

3.1 Caractéristiques des sédiments

Les sédiments présentent un gradient granulométrique décroissant du chenal vers les rives d'une part et du fond vers la surface d'autre part. En portant l'ensemble des résultats des analyses granulométriques sur un diagramme triangulaire de texture, les points représentatifs des échantillons apparaissent alignés sur une droite qui rejoint le pôle S au segment A-L. La texture varie donc globalement en fonction de l'importance relative de la fraction sableuse fine. Le gradient granulométrique transversal traduit la diminution des vitesses de courant qui est déterminée par la distance au chenal, tandis que le gradient vertical témoigne d'une évolution de la sédimentation dans le temps.

Une sédimentation fine argilo-limoneuse s'est progressivement substituée à la sédimentation sableuse fine d'origine.

Par ailleurs les sédiments accumulés dans le piège expérimental ont une teneur en fines plus faible. Le piège, de dimension réduite est peu favorable à la décantation des fines. Les sédiments sont mis en place sous l'action d'un courant. Le piège fonctionne sur le plan sédimentologique, comme le chenal.

Le grain moyen des sédiments est situé dans la fraction 10-20 μm pour 60 % des échantillons. Les dépôts à dominante sableuse ont un grain moyen compris entre 20 et 60 μm . Les sables grossiers, quantitativement peu importants, sont toujours rencontrés au dessus du substratum mais aussi parfois intercalés dans les vases. Dans ce cas, ils comblent vraisemblablement d'anciens chenaux.

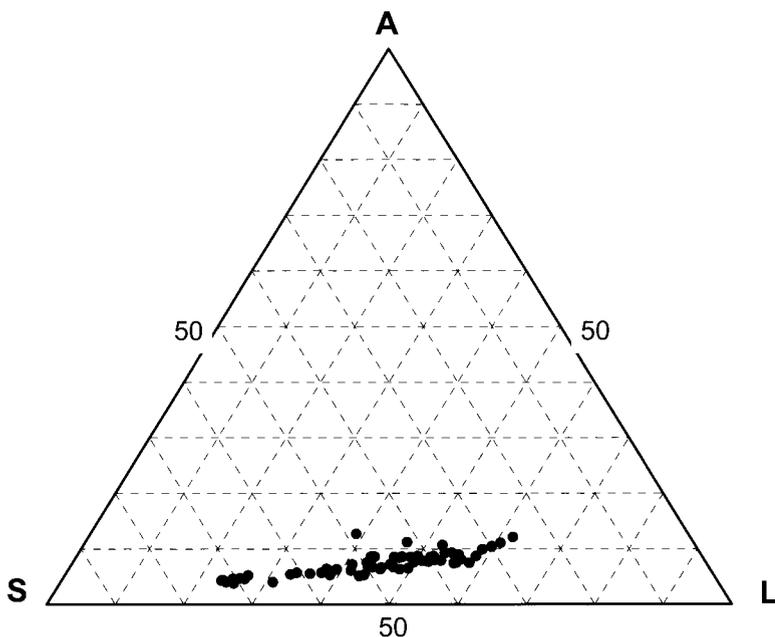


Figure 3 : Caractéristiques granulométriques des sédiments de la vasière de Lyvet.

Argile : 0 – 2 μm Limons : 2 – 20 μm Sables : > 20 μm

Les examens au Microscope Electronique à Balayage (MEB) montrent que la fraction sableuse des vases est constituée de fragments lithiques, de minéraux et de bioclastes. Les minéraux les plus abondants sont le quartz, les feldspaths et les micas tandis que les minéraux accessoires sont les minéraux lourds : tourmaline, andalousite, staurotide et hydroxydes de fer. La dominance de bioclastes calcaires témoigne d'une prépondérance des apports marins. Quelques fragments biogènes siliceux (frustules de diatomées, spicules d'éponge...) sont également observés. La fraction fine a un aspect phylliteux et comporte des argiles véritables, d'abondants débris biogènes issus de l'attrition des tests calcaires et siliceux et une fraction organique peu importante (2 % de carbone organique).

La nature minéralogique des sédiments montre une origine mixte détritique et biogène. La fraction détritique provient du remaniement des formations d'altération des roches métamorphiques locales et des limons quaternaires (Estéoule et al, 1971). La fraction biogène est surtout carbonatée et d'origine marine. La teneur moyenne en carbonates est importante, voisine de 27 %. Les caractéristiques minéralogiques des sédiments montrent bien la prédominance des apports marins dans l'estuaire.

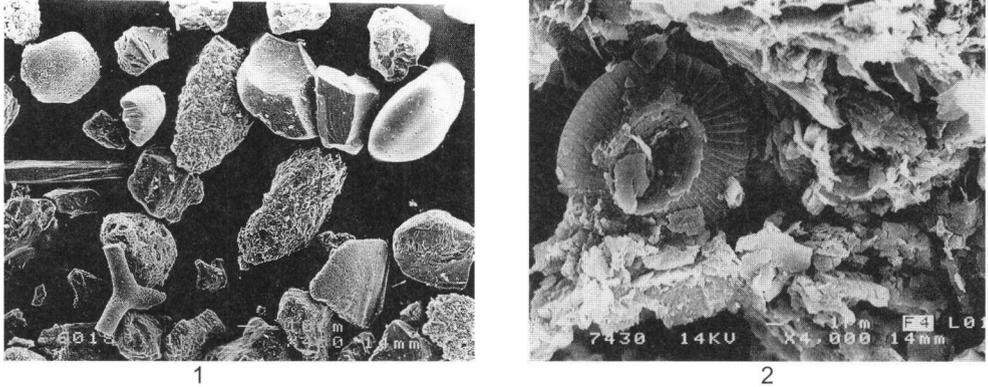


Figure 4 : Examen au MEB des sédiments du site de Lyvet. 1 – Fraction sableuse fine. 2 – Fraction fine argilo limoneuse.

Les vases molles de surface ont une densité sèche comprise entre 0,4 et 0,5 et une teneur en eau élevée qui fluctue entre 150 et 200 % (exprimée par rapport au poids sec des sédiments). Après leur dépôt, les vases se compactent rapidement et à 50 cm de profondeur leur densité sèche est toujours supérieure ou égale à 0,7. Au delà, les vases et sédiments sont plus fermes et la densité sèche fluctue de 0,9 à 1,3 en fonction de leur teneur relative en sables fins. La densité sèche moyenne des sédiments prélevés à plus de 50 cm est de 1,07 (35 mesures) et parallèlement les teneurs en eau sont à des valeurs voisines de 60 %.

3.2 Faune benthique

Le peuplement inféodé à la vasière de Lyvet est constitué d'espèces caractéristiques des zones estuariennes (tableau I) Parmi celles-ci, trois sont dominantes : l'annélide polychète *Nereis diversicolor*, le mollusque bivalve *Scrobicularia plana* et le crustacé isopode *Cyathura carinata* (Lang, 2000).

Cet inventaire conforte le classement défini par Retiere (1979). Le site de Lyvet se situe dans la zone estuarienne à salinité faible du bassin maritime. Plusieurs auteurs (Costil et al, 1997 ; C.O.E.U.R., 2002) ont souligné que la structure de ce peuplement peut être profondément modifiée par des événements ponctuels tels que les fortes crues du fleuve et les vidanges du barrage hydroélectrique de Rophemel qui est situé dans la partie amont du bassin versant. Ceux-ci entraînent la réduction des effectifs voire la disparition d'une ou plusieurs populations. La cinétique de reconquête du milieu est surtout conditionnée par la stratégie de

reproduction propre à chaque espèce : elle est rapide pour les espèces à phase larvaire pélagique, lente pour les autres.

ANNELIDES	MOLLUSQUES		CRUSTACES		INSECTES
Oligochètes spp.	Bivalves	Gastéropodes	Isopodes	Amphipodes	
<i>Nereis diversicolor</i>	<i>Abra tenuis</i>	<i>Hydrobia ulvae</i>	<i>Cyathura carinata</i>	<i>Corophium sp.</i>	Larves de Diptère
<i>Polydora antennata</i>	<i>Scrobicularia plana</i>		<i>Idotea chelipes</i>	<i>Orchestia gammarelus</i>	
<i>Streblospio Shrubsolei</i>					

Tableau I : Organismes inventoriés dans la vasière de Lyvet.

4. Evolution du site après l'extraction des sédiments

L'étude a comporté après les travaux de dragage, le suivi de la sédimentation dans le piège, l'évaluation de l'érosion des vasières et enfin le suivi de la colonisation du fond par la faune benthique.

4.1 Sédimentation dans le piège

Les mesures bathymétriques faites dans les 3 profils montrent que la sédimentation a été optimale dans les profils 2 et 3 pendant le premier semestre de fonctionnement du piège (tableau II). Les dépôts ont été moindres dans le profil P1 à l'entrée du piège car les courants de jusant ont sans doute remis en suspension une partie des sédiments pendant les phases de vidange de la fosse. La photographie aérienne met bien en évidence la présence de chenaux plus profonds dans ce secteur (figure 5).

Après 1 an de fonctionnement, le piège a continué de se combler, mais les apports ont progressivement diminué dans le temps. Les dernières mesures réalisées après 25 mois montrent une légère diminution de l'épaisseur moyenne dans les 3 profils. Cette évolution témoigne d'une érosion et/ou d'une compaction progressive des sédiments. Le piège est aujourd'hui dans sa phase terminale de comblement et la fosse résiduelle n'a plus un volume suffisant pour favoriser la décantation des matières en suspension. Certains courants de jusant sont sans doute assez forts pour provoquer une érosion partielle des dépôts. Il est vraisemblable que le piège stocke encore épisodiquement des sédiments, mais ceux-ci peuvent être partiellement érodés pendant certains cycles de marées.

L'évolution dans le temps des volumes de sédiments (figure 6) montre un remplissage très rapide du piège pendant les 6 premiers mois de fonctionnement, puis un ralentissement relatif. La première phase de comblement a été favorisée par la morphologie du fond de la cuvette. La fosse a constitué à la fois un piège efficace et un bassin de décantation pendant toute la durée des étales. Au fur et à mesure du remplissage, les apports sédimentaires en provenance du chenal ont été moindres car la fosse a atteint un niveau topographique plus élevé que le chenal. La diminution progressive de la tranche d'eau est également un facteur moins favorable à la décantation des matières en suspension.

Les analyses granulométriques montrent que les sédiments ont une texture de plus en plus fine. Le grain moyen qui fluctuait de 15 à 25 μm durant la première année est désormais uniforme et voisin de 10 μm . Le remplissage terminal du piège se fait actuellement à une vitesse de plus en plus lente et proche de celle mesurée sur la vasière avant la création du piège.

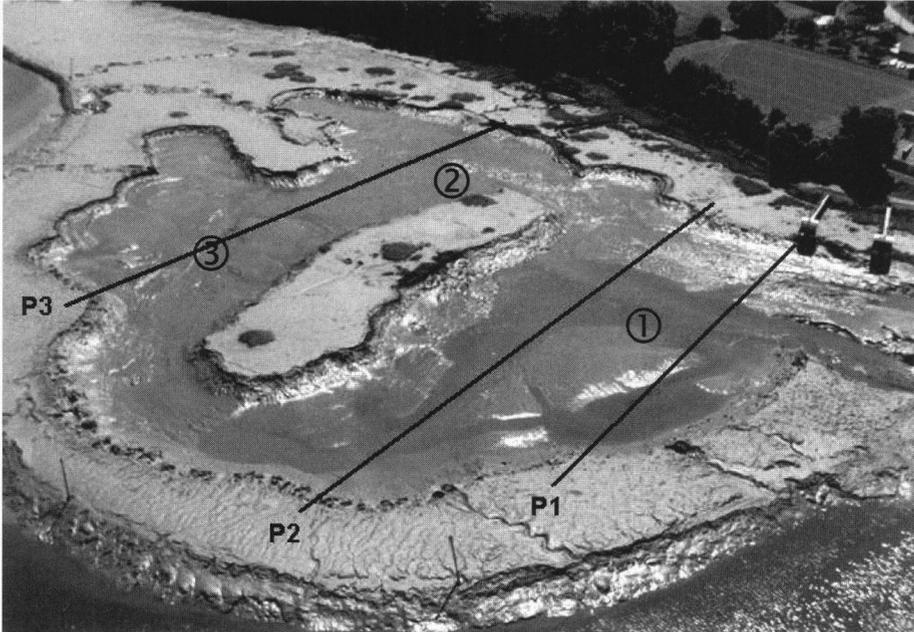


Figure 5 : Vue aérienne du piège. Situation des profils bathymétriques et des stations d'étude de la faune benthique.

Profil	Épaisseurs moyennes des sédiments en cm					
	08/06/01 (2 mois)	19/07/01 (5,5 mois)	21/03/01 (1 an)	03/07/02 (15 mois)	26/11/02 (20 mois)	05/05/03 (25 mois)
1 (amont)	16	58	160	158	205	195
2	40	87	139	172	188	180
3 (aval)	41	84	127	150	164	160
Volume en m^3	9 600	21 600	37 400	43 300	49 150	47 250

Tableau II : Evolution des épaisseurs moyennes de sédiments dans les 3 profils et du volume total des sédiments dans le piège.

4.2 Erosion de la vasière

Le creusement du piège expérimental (10 000 m^3) en 1996 puis son agrandissement (80 000 m^3) en 2000 ont entraîné une érosion immédiate de la

vasière périphérique. Pendant la période d'efficacité maximale du piège agrandi (avril 2001-décembre 2002) la vitesse d'érosion a été de 11 mm.an^{-1} dans la partie médiane de la vasière et de 117 mm.an^{-1} dans le secteur situé entre le piège et le chenal. Au total, la vasière s'est abaissée respectivement de 25 mm et 500 mm dans ces deux stations alors qu'elle a continué de s'élever légèrement à proximité de la berge. Il est clair que la forte érosion de la bordure du piège est due aux courants de surverse induits par le flot. L'impact du piège de Lyvet sur la vasière de Morgrève n'a pu être établi faute de mesures. La station de Morgrève avait été détruite pendant les travaux de curage en 2000. Il apparaît toutefois que la vitesse moyenne d'envasement à Morgrève est stable et voisine de 26 mm.an^{-1} depuis 1999.

LYVET

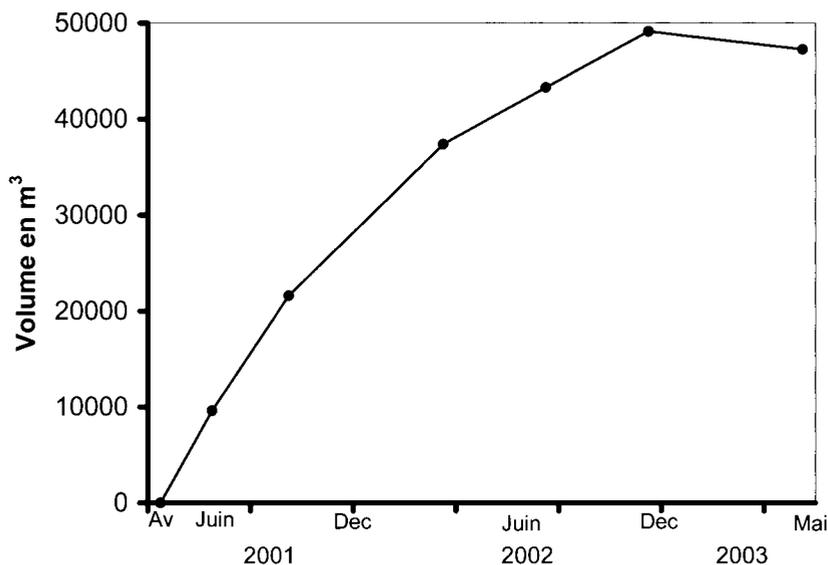


Figure 6 : Evolution des volumes de sédiments accumulés dans le piège de Lyvet. Période avril 2001 – juin 2003.

Ce taux d'envasement est tout à fait comparable à celui mesuré à Lyvet avant travaux et est en parfait accord avec ceux déduits de la datation au ^{210}Pb des dépôts, à une profondeur comprise entre 15 et 35 cm à Lyvet (Bonnot-Courtois et al, 2002). Par ailleurs, les résultats des mesures dans les 5 sites montrent :

- un gradient d'envasement décroissant de l'amont vers l'aval,
- des remises en suspension périodiques de sédiments fins dans la partie basse de certaines vasières qui se déposent ensuite en partie haute. L'élévation des vasières se fait par paliers à l'occasion d'un nombre limité de "cycles de marées",

- la vitesse maximale d'envasement semble constante et voisine de 26 mm.an^{-1} dans le secteur amont de l'estuaire où transite le bouchon vaseux.

4.3 Colonisation du piège par la faune benthique

Le suivi biologique réalisé à la fin des travaux d'extraction a permis de préciser la cinétique de colonisation par la faune benthique du piège. Lors du premier relevé effectué en juin 2001, 4 espèces ont été recensées dans les trois stations dont les trois espèces dominantes du peuplement de la vasière (*Nereis diversicolor*, *Scrobicularia plana* et *Cyathura carinata*). La faune s'est ensuite enrichie notamment d'espèces nouvelles dans ce site. La cinétique de colonisation diffère selon les espèces. Ainsi, les effectifs de *Scrobicularia plana* atteignent des densités relativement importante dès le mois de septembre 2001. Après une phase de stabilisation en hiver et printemps 2002, les densités augmentent nettement en juillet 2002 et sont alors sensiblement supérieures à celles de la vasière voisine. Depuis le mois d'octobre 2002, les effectifs diminuent régulièrement (figure 7a).

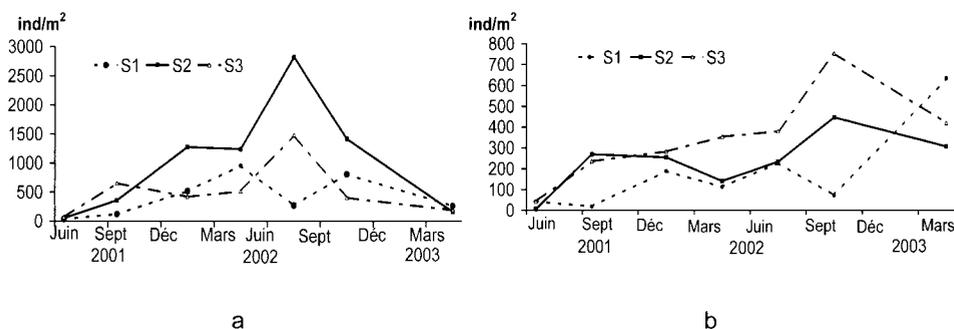


Figure 7 : évolution des effectifs de *Scrobicularia plana* (a) et *Nereis diversicolor* (b) dans les trois stations.

Le développement de *Nereis diversicolor*, est similaire la première année à celui de *Scrobicularia plana*. Par contre, les effectifs ont ensuite continué de croître pour atteindre des valeurs proches de celles de la vasière (figure 7b).

Parmi les espèces nouvelles du site, nous pouvons citer l'annélide polychète *Nephtys hombergii*, les mollusques bivalves *Ruditapes philippinarum* et *Cerastoderma edule*. Les deux premières sont rencontrées ponctuellement avec de faibles densités, tandis que la coque *Cerastoderma edule* est toujours présente depuis septembre 2001 dans les stations 2 et 3 situées dans la partie aval du piège. Les densités de la coque chutent sensiblement depuis octobre 2002 (figure 8a).

L'évolution des biomasses traduit une colonisation rapide du piège. Les biomasses maximales ont été enregistrées en juillet 2002 dans les deux stations aval puis elles ont diminué pour atteindre en avril 2003 des valeurs comparables à celles mesurées dans la vasière.

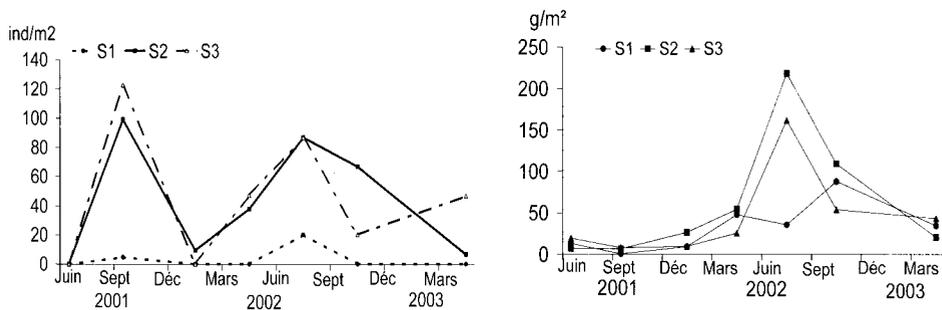


Figure 8 : Evolution des effectifs de *Cerastoderma edule* (a) et de la biomasse totale dans les trois stations du piège (b)

Discussion

La partie amont du bassin maritime est aujourd'hui dans sa phase terminale de comblement et cela se vérifie par l'extension rapide des îlots de végétation halophyte en aval du Châtelier. La vitesse de sédimentation y est très importante, voisine de 26 mm.an⁻¹ et de ce fait tout le secteur compris entre Lyvet et Morgrève allait devenir à court terme un marais salé.

Le maintien d'un équilibre naturel passe nécessairement par la gestion des apports sédimentaires. Ces apports ne peuvent en l'état actuel des connaissances, être évalués avec précision. Toutefois les différents usagers de l'estuaire s'accordent à dire que le volume total de sédiments à draguer serait aujourd'hui supérieur à 1 million de m³. Ils ont donc proposé un programme d'extraction des sédiments puis de gestion des apports afin d'assurer la sauvegarde du milieu.

Le concept de piège à sédiment permet de répondre à cet objectif. Il présente par ailleurs plusieurs avantages au regard des méthodes traditionnelles de dragage. Les interventions sont limitées à des aires très réduites et de ce fait la richesse du milieu est préservée. Les suivis biologiques réalisés à Lyvet montrent que l'impact du chantier est restreint dans l'espace et dans le temps. Le piège est colonisé par toutes les espèces de la vasière 3 mois après la fin des travaux. La technique d'extraction retenue et la période de réalisation du chantier ont été des facteurs favorables. L'extraction par aspirodragage avant la période de reproduction a facilité une colonisation rapide. Le piège constitue en outre un milieu nouveau qui présente des caractéristiques intermédiaires entre le chenal et la vasière. Il favorise temporairement l'accroissement de la richesse spécifique du site. Toutefois, les espèces nouvelles et notamment la coque *Cerastoderma edule* tendent à disparaître au fur et à mesure du comblement du piège.

La gestion des sédiments selon le concept du piège peut concerner des volumes importants. Les volumes extraits à Lyvet depuis 1990 s'élèvent à 100 000 m³ et la quantité totale de sédiments piégés est aujourd'hui de 55 000 m³. Le piège a donc permis de gérer au total 155 000 m³ sur une surface réduite qui n'excède pas 3 hectares. Son curage périodique est nécessaire car il se comble rapidement en moins de 2 ans. Son efficacité permet d'assurer la gestion de 25 000 m³ de sédiment par an dans ce seul site.

Le site de Lyvet présente des conditions hydrodynamiques particulièrement favorables qui ne peuvent se retrouver à l'identique dans d'autres vasières. Il semble toutefois opportun d'implanter d'autres pièges dans les anses soumises à un fort envasement. Le choix devra s'appuyer sur des critères morphologiques, sédimentologiques et biologiques. Le modèle hydrosédimentaire développé par EDF Division Recherche et Développement devrait constituer un outil précieux d'aide à la décision (Guesmia et al, 2001).

La démarche entreprise pour assurer la gestion des apports sédimentaires dans le bassin maritime de la Rance s'inscrit parfaitement dans le cadre d'une politique de développement durable.

Bibliographie.

Bonnot-Courtois C., Lafond L.R., 1991 - Caractérisation et comportement des vases dans l'estuaire de la Rance. *Rapport EDF/Lab. de Géomorphologie EPHE*. 107 p.

Bonnot-Courtois C., 1993 - Analyse comparée des effets de dragage et de chasse hydraulique sur l'envasement à l'amont du bassin maritime de la Rance. *La Houille Blanche*, 8 : p 539-550.

Bonnot-Courtois C., Caline B., L'Homer A., Le Vot M. 2002 - La Baie du Mont Saint Michel et l'Estuaire de la Rance. *CNRS, EPHE TotalFinaElf*. Mémoire 26. 256p

Boumans R.M.J., Day Jr., J.W., 1993. High precision measurements of sediment elevation in shallow coastal areas using a sedimentation-erosion-table. *Estuaries* 16: 375-380.

Brun J., - La vallée de la Rance. In Durand et Lardeux (éd.) : *Bretagne ; Guides Géologiques Régionaux ; éd. Masson, 2^e édition*, 209 p.

C.O.E.U.R., 2002 - Bilan à 18 mois. Curage 2000-2001. Site de Lyvet. *Rapport C.O.E.U.R.*, 64 p.

Costil K., Lang F., Jigorel A., 1997 - Etudes des compartiments sédimentaires et biologiques de la plaine de la Ville Ger. *Rapport d'étude. Université de Rennes I - INSA de Rennes - Comité des Elus et des Usagers de la Rance*. 53 p.

Estéoule J., Estéoule-Choux J., Perret P., 1971 - Constitution minéralogique et origine des limons de la côte nord-est de la Bretagne. *C.R. Acad. Sc. Paris*. t. 273, p.1355-1358.

Guesmia M., Cheviet C; Macur O., 2001 – Modélisation Hydrodynamique et hydrosédimentaire. Etude des scénarios de gestion de l'estuaire. *Rapport EDF*, 93 p.

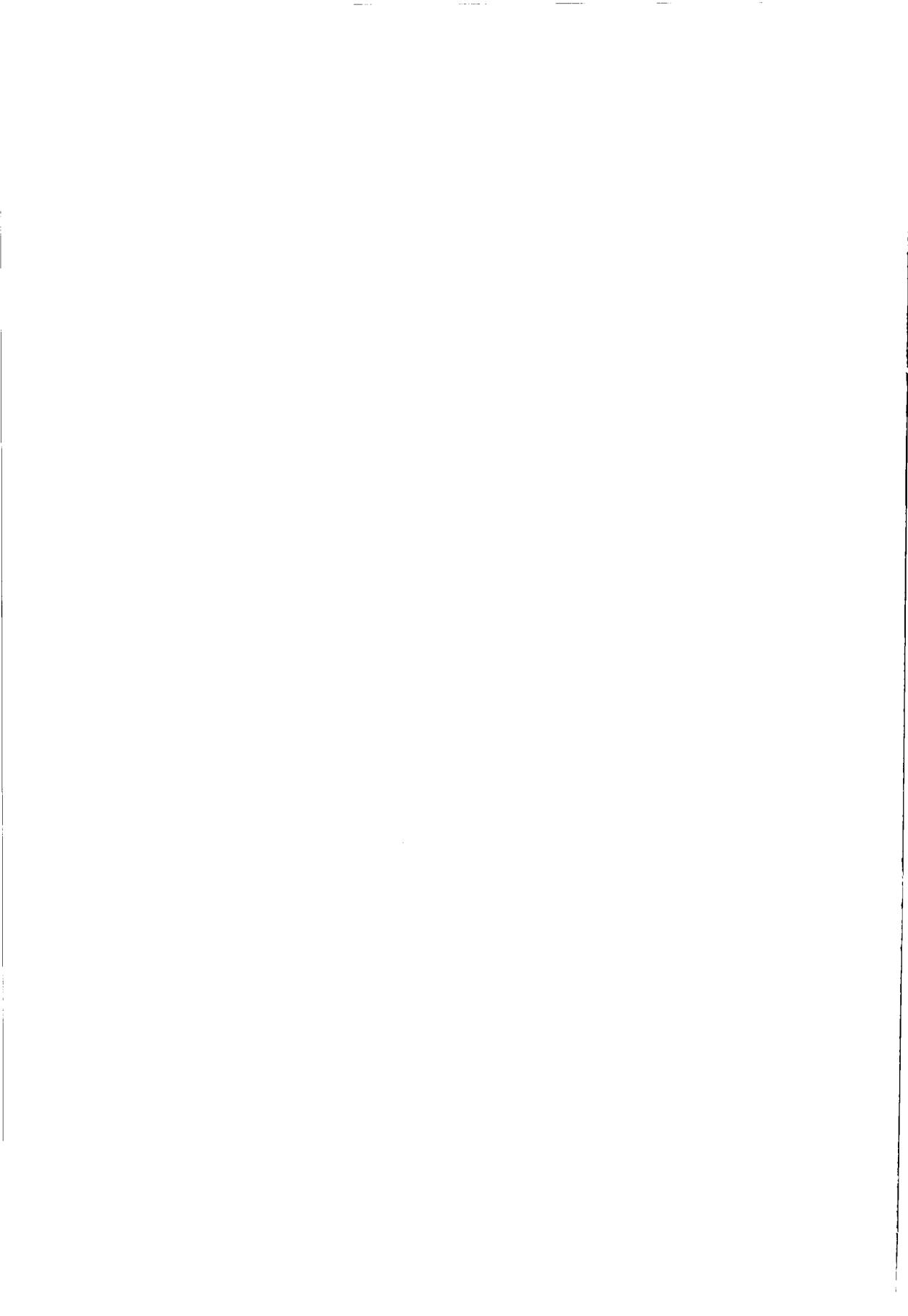
Jigorel A, Pitois F., 1998 - Gestion expérimentale des apports sédimentaires dans l'estuaire de la Rance, France. *Actes du 8ème Congrès International de AIGI. Vancouver. Canada 21 - 25 septembre 1998*. Volume 5. p 3859-3865.

Lang, F., 2000 - Suivi des Peuplements d'Invertébrés Benthiques des vasières exondables en Rance maritime. *Rapport C.O.E.U.R./Univ. Rennes I*, 49 p.

LCHF, 1982 - Etude sédimentologique de l'estuaire de la Rance. *Rapport Général Institution interdépartementale pour l'Aménagement de la Rance Propre*. DDE Ille et Vilaine. 21 p.

Retiere, C., 1979 - Contribution à la connaissance des peuplements benthiques du golfe normando-breton. *Thèse d'Etat, Univ. Rennes I*, 431 p.

Ruellan A., 1956 - La Rance maritime et ses abords. Etude morphologique. *Mem. Labo Géomorphologie EPHE*. 7. 101 p.



Dragages d'entretien du Rhône et Environnement

Maintenance dredging of the Rhône River and the Environment .

Eric DOUTRIAUX

Luc LEVASSEUR

Compagnie Nationale du Rhône

2 rue André Bonin

69316 LYON Cedex 04

Tél.: 04 72 00 69 14

04 72 00 69 26

Fax: 04 72 00 67 75

E. mail: e.doutriaux@cnr.tm.fr

l.levasseur@cnr.tm.fr

Résumé

A travers les cahiers des charges des différentes chutes réalisées, l'Etat a fixé à la CNR un certain nombre d'obligations en matière d'entretien du lit du fleuve, visant notamment au maintien du chenal navigable et des ouvrages de navigation, et à la conservation de la capacité d'évacuation des crues. Dans le cadre de ses obligations, la CNR est amenée à entreprendre des travaux de dragages. Ces travaux doivent être examinés au regard des différentes réglementations susceptibles de les concerner: Loi "Pêche", Loi sur l'Eau, Installations classées pour l'environnement, et des politiques à l'échelle du bassin. La CNR a entrepris différentes démarches à caractère technique et administratif en vue d'entreprendre ces dragages dans un cadre juridique durable, compatible avec les obligations qui lui sont faites et respectueux de l'environnement.

Abstact

In the specifications of the different heads developed, the French government has set out a certain number of obligations to be carried out by C.N.R. related to river bed maintenance, with the aim of keeping the waterway navigable and preserving its capacity to remove floods. C.N.R. carries out dredging operations in the framework of these obligations in compliance with the different regulations likely to be concerned: the Law on Fishing, the Law on Water, Installations Classified for the Environment, and policies related to the catchment area. C.N..R takes different technical and administrative approaches in view to ensuring that these dredging operations are carried out in a sustainable legal framework compatible with its obligations and that they respect the environment.

Mots-clés : Rhône, Entretien, Dragages, Procédures, Environnement

Keyword : Rhône, Maintenance, Dredgings, Environment

1 - Introduction

La gestion des flux solides est une constante des préoccupations rhodaniennes. Elle a trouvé ses dernières traductions dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (S.D.A.G.E.) du bassin Rhône-Méditerranée-Corse et plus récemment dans l'Etude Globale pour une stratégie de réduction du risque inondation dû aux crues du Rhône. L'enjeu est la conservation des grands équilibres morphodynamiques et à travers elle des multiples fonctionnalités du fleuve. La CNR, en cohérence avec les politiques de bassin, et dans le cadre des missions qui lui ont été confiées, est un acteur de la gestion sédimentaire. Parmi les divers leviers d'action, nous avons choisi de resituer dans ce contexte les dragages d'entretien.

2 - Les obligations réglementaires de la CNR

La compagnie Nationale du Rhône, concessionnaire de l'aménagement du Rhône entre la frontière suisse et la mer, a en charge l'aménagement et l'entretien de celui-ci selon les termes du cahier des charges général annexé à la convention de concession générale.

Les travaux réalisés depuis 50 ans ont conduit à la réalisation de 18 chutes dans le cadre de cahiers des charges spéciaux.

Parmi les prescriptions des cahiers des charges quatre types d'obligation peuvent conduire la CNR à intervenir sur le lit du Rhône, notamment par dragage.

Dans les secteurs non protégés par des endiguements, il s'agit du principe de non aggravation des niveaux en crue par rapport à l'état avant aménagement. L'entretien du lit du Rhône, tel que prévu par les cahiers des charges spéciaux est celui des profondeurs nécessaires à l'évacuation des crues (cf. article 16 des cahiers des charges spéciaux, rappelé ci après dans la présente notice).

Dans les secteurs protégés par des endiguements, il s'agit de préserver une différence minimale entre la cote d'arase des digues et le niveau de la crue exceptionnelle. Cette marge ou revanche est fixée par les cahiers des charges spéciaux ou les dossiers d'exécution qui ont été soumis en leur temps à **l'approbation de l'Administration conformément aux textes relatifs aux concessions de force hydraulique.**

En ce qui concerne la navigation la CNR doit maintenir un chenal de navigation dont les caractéristiques sont définies à l'article 7 du cahier des charges général.

Enfin, l'entretien en parfait état des ouvrages réalisés dans le cadre de la concession, inscrit à l'article 10 du cahier des charges général, peut consister en

dragages localisés (garages d'écluse, appontements, quais, bassins de virement, amont barrages, prises d'eau, points de réglages ou de mesures, etc).

Rappelons qu'en marge de ce type d'entretien, la C.N.R. procède également à un entretien de la végétation ayant une vocation curative (suppression d'obstacle à l'écoulement) et préventive (limitation de la sédimentation induite par le développement végétal). Cet entretien peut consister en un charriage des bancs de graviers et limons.

3 - Le transport solide sur le Rhône

La CNR a largement contribué par ses mesures et ses publications à la connaissance que l'on a aujourd'hui du transport sédimentaire du Rhône.

L'étude la plus complète sur la question est aujourd'hui celle que Sogrèah a réalisée dans le cadre de l' Etude Globale pour une stratégie de réduction du risque inondation dû aux crues du Rhône.

En matière de **transport par charriage** il faut retenir l'absence de transport solide par charriage à l'échelle du fleuve. La réduction des apports en matériaux grossiers par les affluents et la diminution de la capacité de transport du fleuve conduisent au constat d'une situation d'équilibre (le profil en long du Rhône n'a que peu évolué depuis 1950). Ceci n'exclut pas localement des mouvements à l'échelle d'un tronçon court-circuité ou des apports de la part de certains affluents.

Le **transport de M.E.S.** (Matières En Suspension), est plus important et continu: de **2 à 11 millions de tonnes** par an de Génissiat à Vallabrègues. Bien qu'il ait historiquement subi une diminution, celui ci à travers sa fraction sableuse est encore suffisant à l'alimentation du littoral méditerranéen. L'évolution à la baisse historique des apports à la Méditerranée reste masquée dans l'évolution de la Camargue par l'importance des stocks remobilisés par le transit sédimentaire littoral note l'étude Sogrèah.

4 - La gestion sédimentaire

L'existence d'un transport sédimentaire sur le Rhône, localisé ou général, pose la question de l'évolution des fonds et du respect dans le temps des obligations rappelées plus haut.

A ce stade il faut rappeler que les aménagements ont fait dans leur conception l'objet d'études d'optimisation prenant en compte le transport solide et ses impacts potentiels pour l'intégrer au dimensionnement. Il en résulte qu'on ne note pas aujourd'hui de problème aigu en matière de sédimentation.

Cela n'exclut pas toutefois des problèmes locaux. Une gestion sédimentaire s'impose donc.

Deux grands modes de gestion sont envisageables. La mise en œuvre de chasses permet de concentrer sur des périodes limitées dans le temps l'évacuation de sédiments déposés dans les retenues. C'est le mode de gestion actuellement adopté sur les retenues suisses et par cohérence sur la chute de Génissiat, haute chute immédiatement à l'aval de la frontière. Ce mode de gestion répond à une

demande, qui s'est exprimée dans l'étude globale déjà citée d'une plus grande transparence des ouvrages vis à vis des flux sédimentaires.

Le dragage des matériaux mettant en cause les usages attendus du fleuve, différents modes de dragages sont à leur tour envisageables (simple remise en suspension, déplacement, mise à terre).

Signalons aussi une solution de non-intervention dans certain cas où il peut être montré que les zones de remblais, aggravant potentiellement le passage des crues, se remettent en mouvement avant le passage du débit pour lequel l'aggravation pourrait se manifester (cas des dépôts sablo-limoneux de la confluence de l'Isère).

L'objet de cette présentation est d'examiner plus précisément les dragages dans leur dimension réglementaire et environnementale.

5 - Les chasses

Jusqu'à maintenant, tous les trois ans les exploitants suisses procèdent à une opération de chasse de retenues de Verbois et Chancy-Pougny.

Les chasses sont aussi anciennes que les aménagements suisses. Elles ont leur origine dans l'arrivée massive de sédiments de l'Arve dans la retenue de Verbois. 19 chasses ont été réalisées entre 1945 et 2000. Il en résulte un flux entrant de 1 million de tonnes de M.E.S. dans la retenue de Génissiat (mesuré au pont de Pougny).

Pendant douze jours environ les ouvrages du Haut Rhône sont gérés pour faire transiter le plus à l'aval possible ces matériaux et préserver les tronçons court-circuités.

Lors des chasses l'usine de Génissiat est arrêtée, les barrages à l'aval sont fermés, tout le flux emprunte la dérivation pour préserver les tronçons court-circuités.

A titre indicatif les chasses 2000 ont permis le transit de 1,37 millions de tonnes au barrage de Génissiat.

Ces opérations sont bien sûr gérées pour en réduire au minimum l'impact écologique. Les taux de M.E.S. sont mesurés en continu à l'aval et les ouvrages sont pilotés en fonction de ces taux qui ne doivent pas dépasser 5gr/l en moyenne, ni 10 gr/l plus d'une heure.

6 - Quelques ordres de grandeur en matière de dragages

6.1 - Sur le Rhône par la CNR jusqu'à maintenant

Les travaux d'entretien par dragage ont représenté ces dernières années (voir figure 1):

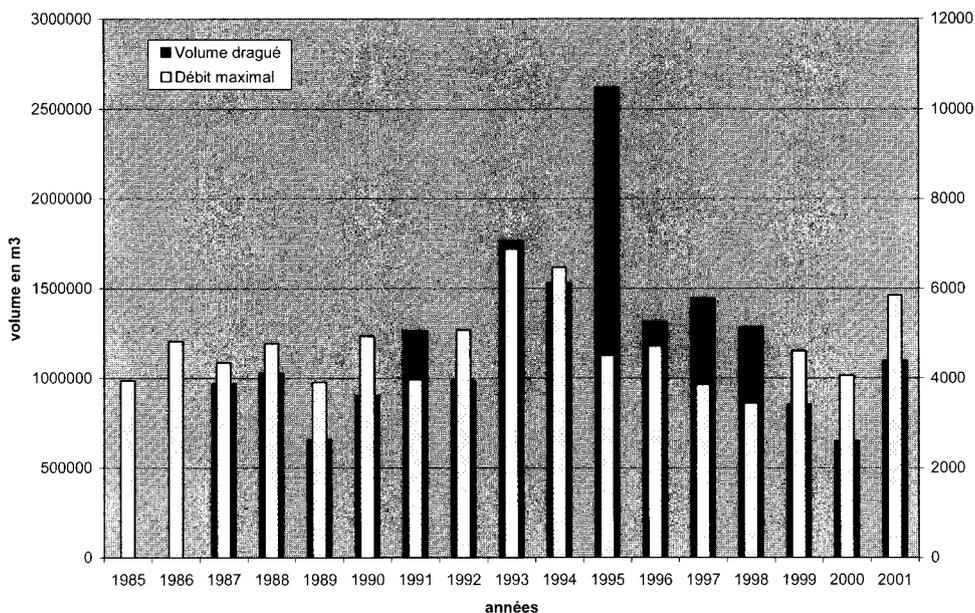


Figure 1 : volume dragué depuis 1987

- volume moyen annuel dragué : environ 1 220 000 m³ (ou 2 400 000 t). Le volume annuel variant entre 0,5 et 2 fois cette valeur (sur 15 années),
- répartition par type de travaux :
 - les travaux de maintien des ouvrages de navigation et des chenaux qui représentent 37 % des volumes dragués; il s'agit d'ailleurs surtout du dragage des garages amont et aval d'écluse ;
 - les travaux d'entretien pour le passage des crues dans les affluents représentent 33 % ;
 - les travaux pour le passage des crues dans le lit du Rhône 17 % ;
 - les travaux à finalité environnementale (restauration de îlons majoritairement) 3 %

Ce chiffre ne rend toutefois pas compte de tous les travaux de cette nature car, s'agissant le plus souvent de travaux de terrassement sur des milieux qui ne sont plus en eau avant intervention, ils n'ont pas été jusqu'à **maintenant intégrés dans la base de données jusqu'à maintenant dédiée aux dragages.**

- les opérations d'exploitation (dragage de prises d'eau, d'échelle limnimétrique, d'amont barrage, etc.) 10% ;

- Répartition par chute (voir figure 2):

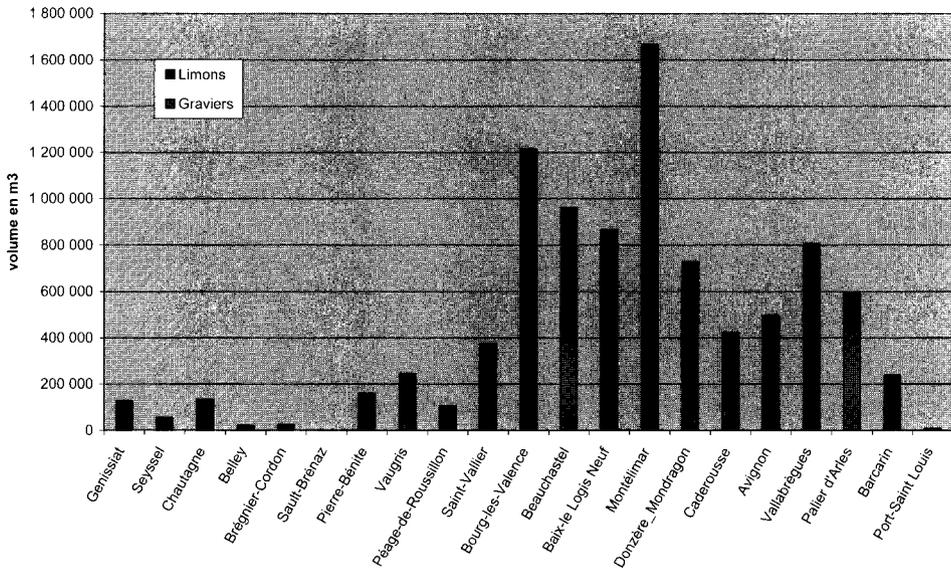


Figure 2 : Volume dragué par chute et nature de matériaux

L'ensemble des chutes à l'aval de l'Isère représente 84 % des dragages.

- Répartition par nature de matériaux (voir figure 2):

Sur les sept dernières années observées, tous travaux de dragages confondus, les graviers ont représenté 29 % des matériaux dragués et les limons 71 %.

Ce partage par type de matériaux peut être croisé avec le type de travaux.

	Graviers	Limons
Navigation	22 %	78 %
Affluents	24 %	76 %
Rhône (crues)	64 %	36 %
Exploitation	7 %	93 %
Environnement	28 %	72 %

Les travaux d'entretien par dragage ont représenté entre 1994 et 2001: 5,7 M€ par an. On peut retenir un coût au mètre cube dragué de 4,5 €.

Ce chiffre masque une distinction importante qu'il convient toutefois de relever entre les dragages avec remise en suspension dans le courant (le plus souvent des limons) et les dragages avec mise à terre (le plus souvent des graviers). Les deux coûts sont respectivement de 4,2 et 7,6 €/m³ constatés sur des dragages ne portant que sur un type.

Il est intéressant de comparer le coût du dragage des graviers avec le prix de vente moyen sur stock à terre de 2€/m³ pour constater, contrairement à une idée

répandue, que l'opération dragage + vente des graviers n'est pas rentable, et que la CNR ne tire pas profit des dragages. Cette situation peut paraître paradoxale, considérant l'intérêt financier passé des extractions en rivière maintenant interdites par la loi. L'explication se trouve dans les exigences techniques et environnementales de la CNR vis à vis des entreprises de dragages et la différence entre extraction (chantier fixe, recherche de la profondeur maximale) et dragage (chantier mobile, profondeur strictement limitée aux besoins hydrauliques ou de navigation).

6.2 - En France

En France, 40 à 50 millions de mètres cube sont dragués chaque année dans les ports autonomes et les principaux ports d'intérêt national au titre des dragages d'entretien.

Un historique national des opérations de curage en eau douce a été réalisé par le bureau d'étude ROYAL HASKONING (ex IWACO) à la demande de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie dans le cadre du Comité Technique National sur la Gestion des Sédiments.

Selon le résultat de l'enquête la quantité moyenne annuelle draguée en France serait de 2.820.000 m³.

Les dragages fluviaux ne représentent donc que 6% des dragages maritimes.

Le rapport met en évidence que la CNR représente 45 % du volume fluvial dragué. Cela fait de la CNR le premier « cureur » de France.

La position singulière de la CNR doit bien sur être appréciée dans le contexte spécifique du Rhône. Si l'on analyse bief par bief les quantités draguées, et 7 fois sur 10, seulement déplacées, il apparaît que celles ci ne représentent que 1 à 3 % du flux de M.E.S.. Le Rhône est une exception en France par son hydrologie et son flux sédimentaire.

7 - Les critères de déclenchement

Les dépôts de matériaux sont liés à de nombreux facteurs imprévisibles sur le moyen terme au premier rang desquels l'hydrologie. Les graviers constitutifs des fonds ne se mettent en mouvement qu'à partir du débit moyen mais c'est la crue de deux ans qu'on considère en général comme morphogène (capable de modifier la morphologie du lit).

Une forte crue d'un affluent peut à elle seule encombrer la confluence au point de rendre nécessaire un entretien alors même qu'avant la crue la situation était satisfaisante.

La stratégie actuelle est simultanément curative vis à vis de l'évolution des fonds (constat d'évolution des fonds après crue) et préventive vis à vis du passage des crues (intervention avant crue suivante).

On peut la résumer ainsi en ce qui concerne le lit du Rhône : surveillance du bief (dont un lever bathymétrique tous les 5 ans au moins ou après chaque crue), puis mise à jour du modèle mathématique hydraulique d'écoulement correspondant, puis calcul des lignes d'eau et comparaison avec la situation de référence. Dans le

cas ou la comparaison met en évidence une aggravation, on procède alors à une étude de l'entretien nécessaire.

8 - De la décision à l'autorisation administrative

Trois textes de loi et leurs décrets d'application s'intéressent aux travaux en rivière et notamment aux dragages ou curages.

- Le code de l'environnement stipule en son article L432.3 (issu de la loi Pêche du 29/06/1984) : « lorsqu'ils sont de nature à détruire les frayères, les zones de croissance ou les zones d'alimentation ou de réserves de nourriture de la faune piscicole, l'installation ou l'aménagement d'ouvrages ainsi que l'exécution de travaux dans le lit d'un cours d'eau sont soumis à autorisation. L'autorisation délivrée en application du présent article fixe des mesures compensatoires visant à remettre en état le milieu naturel aquatique. ».
- La loi sur l'eau (3/01/1992) vise notamment en son article 2 à « assurer la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides » de manière à satisfaire notamment les exigences « de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations ». A cette fin, l'article 10 prévoit des procédures d'autorisation ou de déclaration entre autres pour les travaux en rivière dont la nomenclature a été fixée par décret. Les travaux de dragages sont concernés par deux rubriques :

2.6.0. En dehors des voies navigables, curage ou dragage des cours d'eau ou étangs, hors « vieux fonds, vieux bords », le volume des boues ou matériaux retiré au cours d'une année étant :

1° Supérieur à 5 000 m³.....

2° Supérieur à 1 000 m³, mais inférieur à 5 000 m³..... Déclaration

2.6.1. Curage ou dragage des voies navigables, autre que le rétablissement des caractéristiques des chenaux de navigation lorsque le rapport entre la section à draguer et la section mouillée correspondant aux plus basses eaux est :

1° Supérieur à 10 p. 100..... Autorisation

2° Supérieur à 5 p. 100, mais inférieur à 10 p. 100..... Déclaration

Les dragages consistent fréquemment à déplacer par drague suceuse les matériaux fins déposés pour les remettre dans le courant. A cet égard, il faut signaler qu'une rubrique de la nomenclature visant les rejets exige une demande d'autorisation lorsque notamment le taux de matière en suspension dépasse 90 kg / j alors que le transport sédimentaire naturel du Rhône est de l'ordre de 5 à 10 tonnes / j à Arles. Le seuil ne présente pas un caractère de bon sens, si on l'applique au Rhône. Toutefois la CNR applique une « consigne qualité des eaux », qui vise à contrôler que le taux de MES à l'aval du rejet reste dans la classe de qualité (de la grille du Comité de Bassin), constatée à l'amont du dragage.

- La loi sur les installations classées pour l'environnement (ICPE) du 19/07/76 prévoit des procédures d'autorisation ou de déclaration pour les chantiers qui

peuvent présenter des inconvénients notamment pour la commodité du voisinage ou la protection de la nature et de l'environnement. La nomenclature des ICPE inclut (décret du 9/06/94) la rubrique 25-10 : « *Les opérations de dragages des cours d'eau et des plans d'eau (à l'exception des opérations présentant un caractère d'urgence destinées à assurer le libre écoulement des eaux), lorsque les matériaux sont utilisés et lorsqu'elles portent sur une quantité à extraire supérieure à 2 000 tonnes.* »

La pratique conduit à élargir la rubrique aux matériaux « utilisables ». Dès lors que les dragages conduisent à mettre à terre des graviers, ils rentrent donc dans cette rubrique.

Mentionnons pour mémoire le décret 2002-540 du 18 avril 2002 qui classe comme déchet "les boues de dragage". Une analyse de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable du 18/09/02 précise que les sédiments remis en suspension ne doivent pas être considérés comme des déchets, ni les matériaux valorisables.

Les opérations d'entretien des affluents sont en règle générale réalisées à l'intérieur des « vieux fonds – vieux bords ». Lorsque les matériaux dragués sont des limons, ils sont rejetés dans le courant du Rhône. Les travaux d'entretien sont définis dans un « dossier d'entretien » pour chaque affluent. Ce dossier est envoyé pour information au Service chargé de la police des eaux et pour autorisation au titre de l'article L 432.3 au Service chargé de la police de la Pêche. Trente six affluents sont susceptibles de devoir être entretenus ; 18 ont déjà fait l'objet d'un dossier d'entretien. Celui-ci est en cours de réalisation pour les 18 autres. Lorsqu'il s'agit de graviers, et qu'il n'est pas possible pour des raisons hydrauliques ou économiques de les rejeter au Rhône, une autorisation au titre des ICPE est recherchée avec une validité jusqu'à la fin de la concession soit 2023.

Pour le Rhône, l'entretien du chenal et des ouvrages de navigation ne nécessite pas de procédure particulière. En revanche, un dragage pour le passage des crues cumule les difficultés :

- on cherche en général à descendre un peu au dessous des fonds d'origine pour limiter l'emprise des travaux et draguer une épaisseur minimale ;
- les matériaux sont le plus souvent des graviers qui peuvent rarement être clapés à l'aval compte tenu que l'on est dans une situation hydraulique d'aggravation ;
- les quantités sont importantes.

L'expérience montre que les délais d'obtention de telles autorisations sont longs au regard des enjeux en terme de sécurité, mais il n'est pas souhaité de généraliser l'utilisation possible des procédures d'urgence. Il a donc été décidé dans un souci d'anticipation d'engager une démarche en vue de l'obtention pour chaque bief d'une autorisation de procéder à ces dragages d'entretien au titre des I.C.P.E. ; une telle autorisation vaut en effet également autorisation au titre de la loi sur l'eau qui vaut aussi autorisation au titre de la loi pêche, et ceci sur la durée de la concession C.N.R. soit jusqu'au 31/12/2023.

La C.N.R. doit donc déposer des dossier de demande contenant tous les éléments prévus par les textes et notamment une étude d'impact.

Préalablement au lancement de la procédure I.C.P.E., il a paru nécessaire de rappeler les références technico-administratives qui établissent les obligations de la C.N.R. et notamment les références en matière d'écoulement des crues, les modalités de surveillance des fonds et les simulations hydrauliques et leurs hypothèses qui peuvent conduire la C.N.R. à devoir procéder à d'éventuels dragages, et les limites de ces opérations de dragages.

Ce dossier, baptisé "état de référence" devra recevoir un accord des principaux Services de l'Etat concernés (DRIRE, SNRS et DIREN), avant d'engager une procédure complète.

Cette démarche a été approuvée par le Préfet Coordonnateur de Bassin le 17 mars 2003.

Elle a été retenue par le Comité de pilotage de la "Mission sur les Inondations du Rhône" lors de sa réunion du 27 juin 2003, comité constitué dans le cadre de la mission confiée au Préfet Coordonnateur par Madame la Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable.

9 - Autres aspects environnementaux

Dans le cadre des concertations et études réglementairement organisées, mais plus généralement pour toutes les opérations de dragage, la CNR veille à la préservation de l'environnement.

Le respect des espaces et des espèces

La CNR a achevé un vaste de travail de cartographie des sites d'intérêt écologique sur le domaine qui lui est concédé. Les sites présentant un intérêt particulier à l'échelle de la vallée du Rhône en termes de qualité des milieux ou d'espèces présentes sont dans la mesure du possibles exclus des dragages d'entretien à motivation hydraulique. Il faut toutefois signaler que c'est au titre de la préservation de l'environnement qu'un certain nombre de dragages ont été entrepris dans le but de freiner une évolution sédimentaire qui faisait perdre à des sites leur intérêt écologique (c'est le cas notamment d'ancien bras du Rhône ou lônes). Un dragage ne doit pas être regardé a priori comme une menace pour l'environnement.

La qualité des eaux à l'aval des dragages

La CNR s'impose actuellement une consigne de qualité des eaux à l'aval des dragages. Les paramètres taux de Matières En Suspension (M.E.S.) et teneur en ammoniac sont suivis et le dragage est piloté en veillant (c'est l'esprit de la consigne) à ce que les dragages ne déclassent pas la qualité des eaux (évaluée avec la grille d'évaluation de l'Agence de l'Eau) par rapport à ce qu'elle est en amont .

Du fait notamment d'un débit important qui dilue les effluents et de la dynamique des matériaux fins, le Rhône ne connaît pas les problèmes aigus de l'héritage de concentrations de pollution, que l'on rencontre sur les canaux du nord notamment et qui conduisent à assimiler sédiments et déchets. Par ailleurs le volume remis en suspension à l'occasion d'un dragage est du deuxième ordre par rapport aux flux naturels rappelés en début d'exposé (voir § 4).

Afin toutefois d'éviter que ce constat rapide ne conduise à négliger ici où là quelques polluant susceptibles d'impact, la CNR a engagé un programme d'étude visant passer en revue chaque polluant suivi pour l'eau et pour les sédiments dans le cadre du RNDE, pour identifier ceux que le dragage pourrait compte tenu de leur concentration dans les sédiments, des rendements des dragues et de leur caractéristiques de relargages, amener à l'aval du rejet à des concentrations modifiant la qualité de l'eau. Des études d'impact sur ces polluants seraient alors engagées.

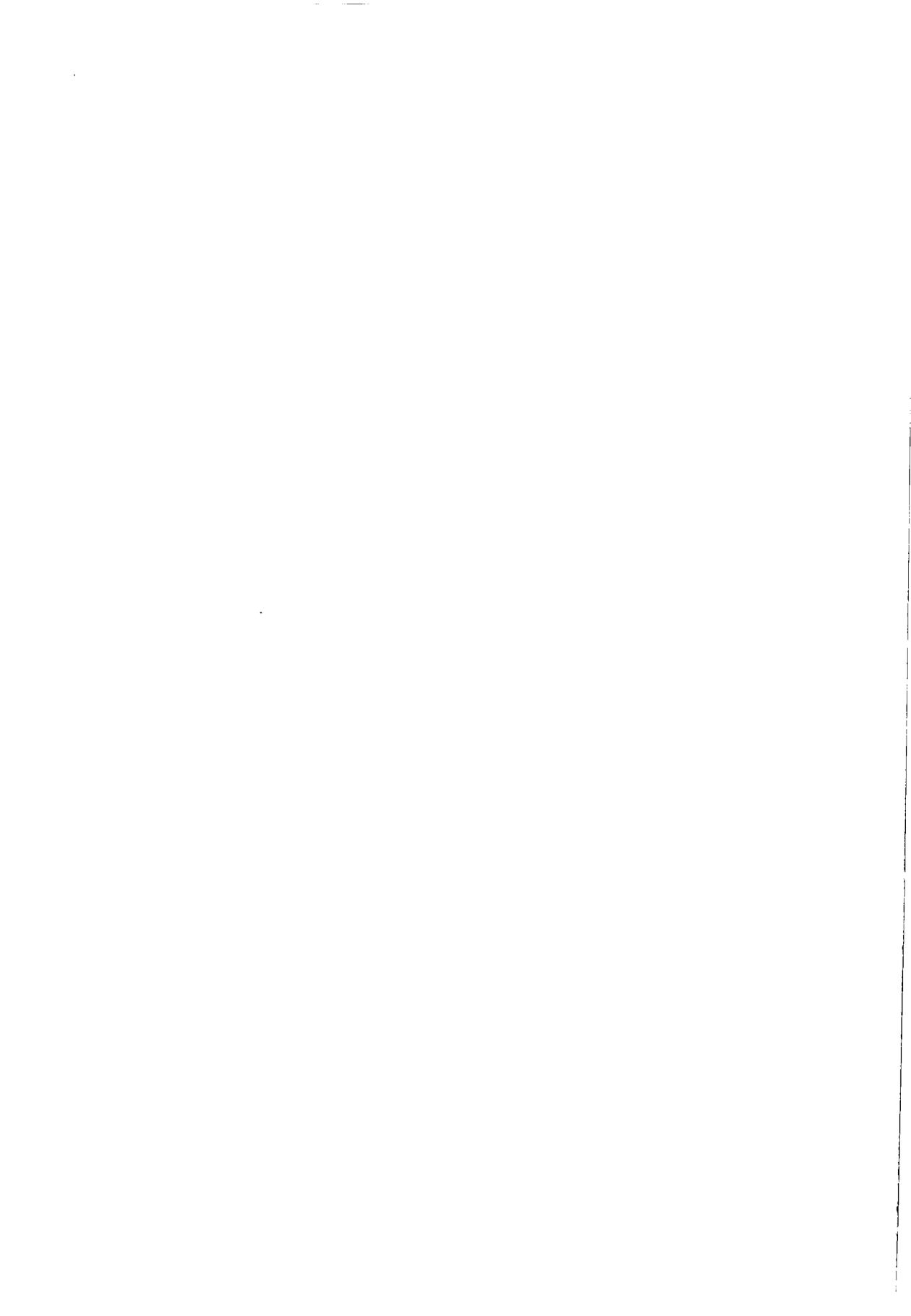
Conclusions

La CNR a toujours attaché une importance particulière

- à la surveillance de l'évolution des fonds; cette surveillance, au delà du respect immédiat des obligations du concessionnaire, a permis de s'assurer que les grands équilibres morphodynamiques sont préservés;
- à la prise en compte de la qualité de l'eau tant à l'occasion des travaux de dragages qu'à celle de l'accompagnement des chasses du haut-Rhône.

La CNR cherche en permanence à actualiser ses pratiques avec les connaissances les plus récentes et contribue dans cet esprit aux programmes de recherche rhodanien sur les divers aspects de la gestion sédimentaire.

Le nouveau cahier des charges de la CNR récemment publié la conforte dans cette culture en prévoyant la mise en place d'un observatoire de la gestion sédimentaire du Rhône.



L'expérience d'Electricité de France dans la gestion du transport solide au droit des retenues.

*Electricité de France experience
in reservoir sedimentation management.*

Céline Barbiero
EDF – CIH – GC Marseille
2, Av. Elsa Triollet, 13482 - Marseille
Cedex 20
Tél : 04 96 14 56 45
Fax : 04 96 14 56 40
E.mail : celine.barbiero@edf.fr

Jean Pierre Bouchard
EDF – DRD – LNHE
6 quai Watier, BP 49 - 78401 Chatou
Cédex
Tél : 01 30 87 78 72
Fax : 01 30 87 81 09
E.mail : jean-pierre.bouchard@edf.fr

Alice Pereira
Agence Eau Adour-Garonne
90, rue du Férétra
31078 Toulouse cedex 4
Tél : 05 31 36 36 66
Fax : 05 61 36 37 28
E.mail : alice.pereira@edf.fr

Alain Poirel
EDF – DTG – Département Surveillance
21 av de l'Europe, BP 41, 38040 Grenoble
Cédex 9
Tél : 04 76 20 21 32
Fax : 04 76 20 21 35
E.mail : alain.poirel@edf.fr

Résumé :

Le transport solide et ses conséquences sur l'envasement des retenues reste une problématique majeure des gestionnaires de barrage. L'expérience d'Electricité de France dans ce domaine conduit à une approche par vallée, prenant en compte, sur le long terme, les conséquences sur la sûreté, l'économie et l'environnement. Elle constitue ainsi une démarche de développement durable permise par l'utilisation de modèles hydrosédimentaires alimentés par des longues chroniques de flux solides. Ces modèles peuvent simuler, à l'échelle du bassin, l'effet d'une règle de gestion nouvelle avec ses conséquences sur l'envasement des retenues et sur l'environnement en aval.

Abstract :

Suspended load and its effects on reservoir sedimentation remains one of the major problems of hydropower management. Electricité de France experience shows that, at a watershed scale, taking into account safety, economy and environment is essential. Thus, sustainable use of reservoirs becomes available through models of reservoir sedimentation, calibrated with long term time series of suspended load. These models can simulate, at a basin scale, and over a long period of time, new rules for hydraulic management of reservoirs, including effects on reservoir sedimentation and undesirable environmental consequences downstream.

Mots-clés : sédimentation, retenue, chasse hydraulique, apports solides

Keywords : reservoir sedimentation, flushing, suspended load

1 Historique de l'étude du transport solide au droit des retenues

Le transport solide est, depuis longtemps, une problématique associée à l'usage anthropique des rivières, que ce soit pour la flottation des bois ou l'exploitation des ouvrages hydrauliques. Historiquement, quatre grandes phases peuvent être distinguées : la découverte des problèmes et les premières mesures, les conséquences de l'envasement sur l'exploitation et la sûreté des ouvrages, la prise en compte de l'environnement, l'approche globale et le développement durable.

1.1 Les premières mesures de transport solide pour les retenues

Suite aux crues de la Durance de 1843 et 1856, pour suivre la « flottabilité » des bois sur la Durance, des profils en long et en travers sont réalisés en 1857. De manière conjointe, sont associées des mesures de matières en suspension (MES) réalisées de 1857 à 1859 au droit de l'échelle de Tallard et de Serre-Ponçon ! De 1868 à 1889, des mesures périodiques sont réalisées sur les stations hydrométriques de Pont Mirabeau et de l'Archidiacre. Les deux séries de mesures (hydrologiques et de MES) sont menées en parallèle avec un objectif conjoint.

En 1913, l'ingénieur Wilhem avait déjà évalué, à partir des mesures précédentes, les taux d'accumulation probables dans le futur barrage de Serre-Ponçon à 2,6 millions de m³ par an, et imaginé quelques moyens de s'en prémunir.

En 1927, une série journalière de mesure des MES est mise en place sur le Drac pour 2 années au droit de la retenue du Sautet. En 1936, M. Walther ingénieur en chef des Forces Motrices Drac et Bonne indiquait que « le remplissage des lacs et retenues artificielles est inéluctable et que l'ingénieur, en combattant ces phénomènes ne prétend point les abolir, mais seulement en différer le terme ».

En 1951, au Congrès des Grands Barrages à New Dehli, M.Drouhin indiquait en synthèse du colloque « que l'ingénieur était mal armé pour lutter contre le phénomène inéluctable du comblement des réserves » et que « il lui paraissait angoissant de penser que d'immenses œuvres humaines génératrices de mieux être dépendaient d'ouvrages dont on n'hésite pas à fixer la durée de vie à moins de deux générations ». Remenieras et Braudeau, 1951, à ce même colloque donnent quelques indications sur plusieurs retenues métropolitaines et pressentent déjà l'intérêt de distinguer la nature des sédiments : vase, sable et débris végétaux, ces derniers représentant, par exemple, jusqu'à 9 t/an/km² sur le réservoir de la Petite Rhue dans le Massif Central...mais ils jugent que "la retenue du Chambon [*sur la Romanche*] ne présente pas d'atterrissements notables" !

1.2 Les conséquences de l'envasement sur la sûreté hydraulique

Dans les années 1960 à 80, l'envasement des retenues est considéré comme un problème à la fois économique (perte de capacité de la retenue, pertes de charge au droit des grilles) et de sûreté (vannes de fond colmatées rendues inopérantes).

Dès lors, deux stratégies sont mises en œuvre : la réalisation de chasses en crue (ou à partir de lâchures sur les aménagements amont) et la reconstruction de vanne de fond ou de demi-fond bien au dessus des précédentes, avec des dispositifs moins sujet au colmatage et des procédures d'exploitation permettant leur ouverture régulière. A.Berthier et al., 1970, décrivent les problèmes rencontrés sur la retenue du Sautet et du Chambon où de nouvelles vannes de fond sont mises en place après des travaux très importants et très coûteux.

Les chasses réalisées antérieurement aux années 1980 sont décrites essentiellement sur l'aspect transport solide (GRPH Alpes, 1967). Sur quelques retenues de la Basse Isère (GRPH Alpes, 1974 et 1977) ou du Haut Rhône (CTGREF 1975) des mesures de MES sont réalisées pour en calculer l'efficacité. Des concentrations supérieures à 100g/l ne sont pas rares. Associées très probablement à des déficits en oxygène dissous et à des concentrations d'ammoniaque élevées (en l'absence d'épuration des eaux usées), ces opérations de chasses ont des effets drastiques sur l'environnement.

1.3 La prise en compte de l'environnement

A partir des années 1980, la prise en compte croissante de l'environnement conduit à modifier les protocoles de réalisation des chasses en essayant d'en limiter les impacts via des contraintes réglementaires. Celles-ci définissent en général des conditions de réalisation (dates, débits) et des contraintes physico-chimiques (Cailmail et al., 1993).

Des études sont menées pour estimer la toxicité du mélange eau-sédiments : en 1988, l'ENSAT évalue la toxicité des sédiments de Plan d'Arem sur la truite ; Garric et al., 1990, donnent, en conditions de laboratoire, la toxicité du couple MES et oxygène dissous pour la truite à partir de sédiments de la Basse Isère.

Sur certains sites, l'analyse régulière des résultats à périodicité définie (préfigurant les boucles d'amélioration de l'ISO 14001), permet d'adapter les protocoles de réalisation et de suivi environnemental : retenues de la Basse Isère, Aigueblanche sur l'Isère, les Mottets sur l'Arly. Les conditions physico-chimiques deviennent de moins en moins problématiques d'autant que l'épuration des eaux usées améliore la qualité des sédiments (Poirel, 2001). Des programmes régionaux sont mis en place pour estimer les impacts des chasses sur une longue durée, avec une prise en compte croissante de la mesure biologique : programme quinquennal (1996-2000) de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF.

Parallèlement, de nombreuses retenues voient les conditions de chasses et les contraintes réglementaires sur la physico-chimie devenir de plus en plus sévères au point parfois de passer sous les (rares) références en crue. Indépendamment donc des données sur la toxicité, certains aménagements hydrauliques sont soumis à des pressions si fortes que la réalisation de chasses devient impossible réactivant les problèmes d'envasement de la retenue (EPTB Garonne, 2003)...

La sédimentation dans les retenues reste donc, au travers des temps, un problème majeur qui ne trouve pas de solution technique générique induisant souvent des coûts élevés pour des résultats rarement durables. L'approche locale montre là ses limites que ce soit sur les transits de sédiments ou sur les impacts environnementaux.

1.4 Vers une approche globale à l'échelle d'une vallée

A partir des années 2000, les principes de développement durable et d'analyse du cycle de vie des barrages proposent de prendre en compte les problèmes environnementaux à une échelle temporelle bien plus importante. En 2000, la Commission Mondiale des Barrages indique que « la sédimentation et la perte de capacité de stockage qui en résultera à long terme suscitent une vive inquiétude partout dans le monde ». L'érosion littorale en liaison avec les grands

aménagements hydrauliques constitue un impact fréquemment mentionné (Rashad et Ismail, 2000).

Des approches plus globales sont donc imaginées pour gérer « au plus près » les apports sédimentaires. Le programme EDF de Gestion Intégrée des Sédiments (2001-2004) comprend ainsi plusieurs volets complémentaires : estimation des apports liquides et solides, description du fonctionnement hydraulique des retenues et des tronçons de rivière, écotoxicologie des sédiments, modélisation économique couplée débit liquide/débit solide. Ces modèles complémentaires entre eux permettent de tester de nouvelles règles de gestion (chasses, abaissement des plans d'eau sur épisode d'apports, restitution des débits aux adductions complémentaires, curages localisés...) en fonction des apports hydro-sédimentaires observés voire même prévus en temps réel, tout en estimant leurs incidences environnementales et économiques.

2 Les outils de la gestion sédimentaire

2.1 Connaissance des apports solides

2.1.1 Principes

La connaissance des flux particulaires et chimiques reste très partielle en France, par manque de séries de mesures à pas de temps fin (Meybeck, 1994 ; Meybeck *et al.* 2003). Les efforts ont portés sur une connaissance des concentrations moyennes au travers du Réseau National des Données sur l'Eau, négligeant les valeurs extrêmes plus informatives des flux transités ou des effets toxiques.

La mesure spécifique des épisodes de fort apport solide apparaît comme incontournable, la méthode classique qui consiste à établir des relations débit – concentration donnant des résultats souvent médiocres (figure 1).

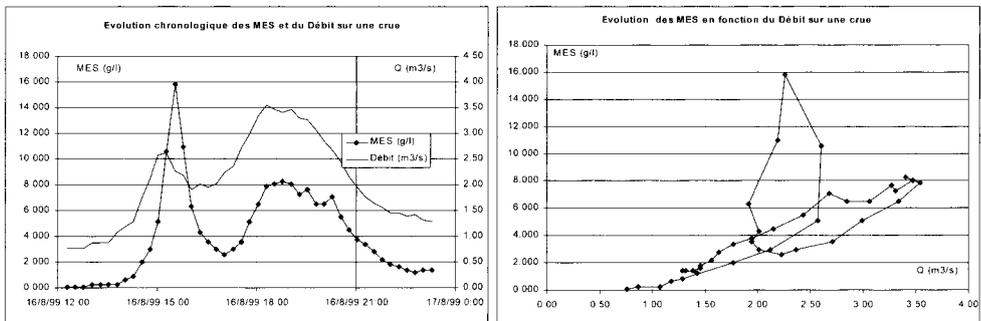


Figure 5 : Evolution des débits et des MES sur le Nant Brun (bassin de la haute Isère)

Pour cela EDF a mis en place sur plusieurs sites (Buëch, Asse et Bléone sur le bassin de la Durance, Ferrand et Romanche sur le bassin du Drac, prises d'eau sur des torrents de la haute Isère et du haut Arc) une stratégie originale qui consiste

- à équiper les sites étudiés de turbidimètres avec une acquisition horaire pendant une période de quelques années (2 années semblant un minimum),

- à réaliser, lors d'épisodes de crues, des mesures manuelles ou par préleveur automatique afin de caler une relation statistique turbidité/MES. Ces épisodes sont anticipés grâce à un suivi hydro-météorologique : évaluation des risques de précipitation intense (hors neige) ou de fusion nivale/glaciaire marquée.
- à établir une relation entre l'hydroclimatologie (en général connue sur une plus longue période) et les flux de MES. Cette relation est calée à partir de modèles hydrologiques dits « à réservoirs » (Garçon, 1996) qui différencient les contributions superficielles (ruissellement, écoulements de fusion nivale/glaciaire) des apports plus profonds (écoulements de sub-surface, apports de nappes...). La prise en compte de ces écoulements superficiels dans un modèle conceptuel à réservoirs sédimentaires, calé statistiquement, permet de reproduire les apports solides en fusion nivale avec l'épuisement progressif des stocks de sédiments disponibles et les hystérésis sur crue (Gautheron, 1995 ; Poirel, 1998).

Les longues séries ainsi reconstituées servent de base à des analyses statistiques diverses : fréquences de dépassement de seuils, pourcentages de sédiment en fonction du temps ou du flux liquide, estimation de la variabilité des apports solides... ou sont utilisées comme entrée des modèles hydrosédimentaires (§ 0).

2.1.2 Connaissances acquises sur les concentrations et flux de MES

Parmi les résultats obtenus, les plus intéressants résident dans les concentrations extrêmes atteintes (Figure 6) sur tous les points de mesure et dans la variabilité rapide des concentrations, parfois à l'échelle de la journée (Figure 7).

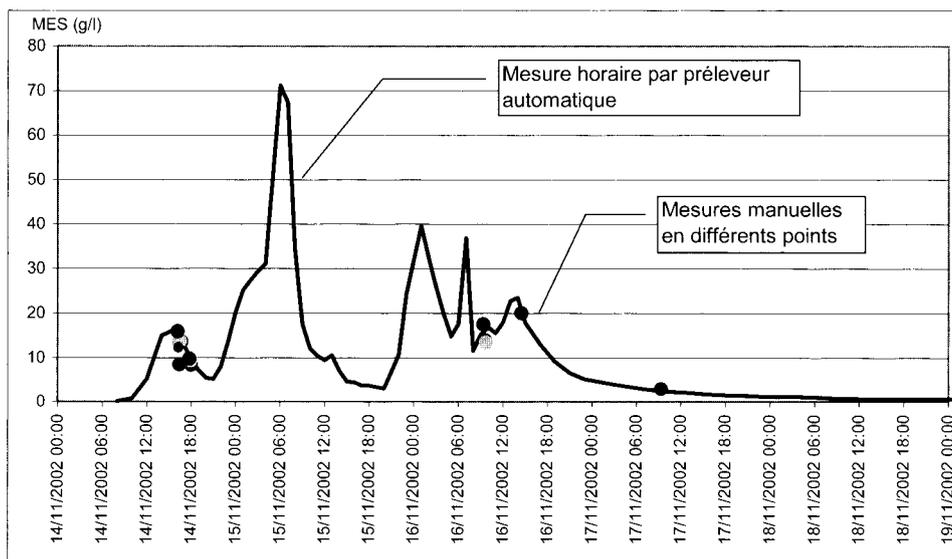


Figure 6 : Evolution des concentrations en MES sur la Bléone, affluent rive gauche de la Durance durant la crue de Novembre 2002. Comparaison des mesures par préleveurs automatique et des mesures réalisées manuellement en différents points de la rivière.

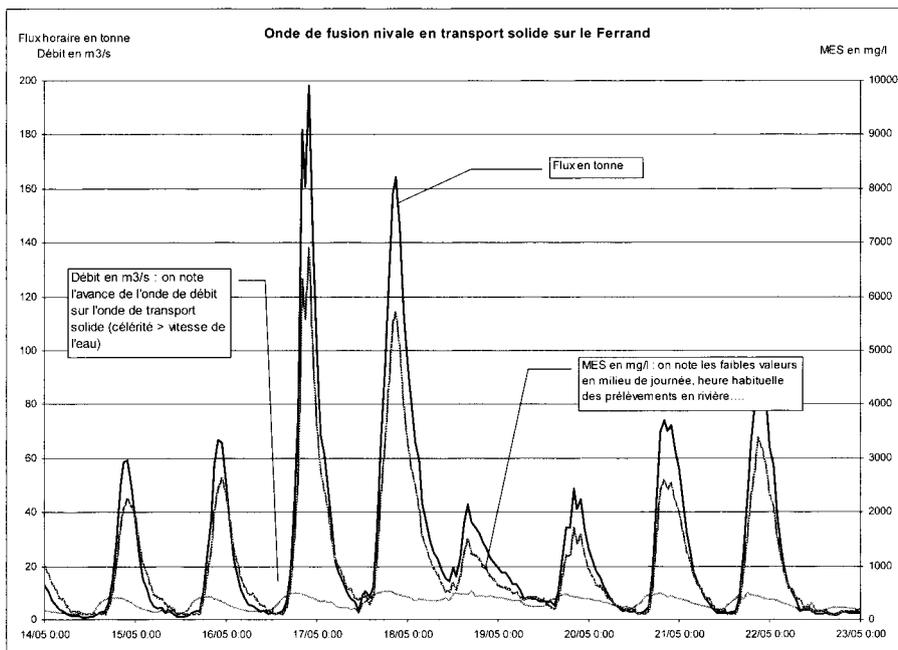


Figure 7 : Evolution des débits, des concentrations en MES et des flux sur le Ferrand, affluent rive droite de la Romanche durant la fusion nivale 2002.

Outre la connaissance fine des concentrations et des flux solides et les statistiques associées, il ressort de ces mesures que

- des concentrations supérieures à 10g/l sur les bassins alpins sont beaucoup plus fréquentes que l'estimation initiale faite d'après les données du RNDE,
- le rôle de la fusion nivale et/ou glaciaire est prépondérant, mais est souvent sous-estimé par des mesures uniquement diurnes sur de nombreux sites,
- les flux solides sont très concentrés dans le temps puisque 50% des flux passent en moins de 1 à 5% du temps selon les bassins (Figure 15).

2.2 Connaissance des processus sédimentaires et leur modélisation

La prise de conscience du coût de la sédimentation et l'émergence des préoccupations environnementales se sont accompagnées d'un besoin en méthodes et outils de prévision et d'optimisation. Initialement, il s'agissait plutôt de se protéger des sédiments lors de la conception de nouveaux aménagements : éviter les affouillements au pied des ouvrages, concevoir des prises d'eau ne s'engravant pas. Un savoir-faire a été acquis principalement sur des modèles physiques.

2.2.1 Modèles hydrosédimentaires généraux

Ces connaissances sur les processus élémentaires de dépôt d'érosion et du tassement des sédiments ont servi de base à l'élaboration de codes numériques hydrosédimentaires à une ou deux dimension, développés au sein de collaborations entre EDF et des organismes publics et scientifiques.

Ces outils sont utilisés pour l'analyse de l'impact local des aménagements et l'évolution morphologique à leur proximité, comme l'illustre sur la Figure 8, la modélisation en 2D du transport sédiments fins dans le réservoir de l'Escale sur le Durance (Maurel et al. 1998).

Des outils spécifiques aux retenues

Le besoin d'outils spécifiques aux problèmes de la sédimentation dans les retenues est apparu ensuite de la nécessité de réduire les coûts des vidanges et leur impact sur l'environnement.

Un programme de recherche sur ce thème intitulé : "impact des sédiments sur la gestion des aménagements hydroélectriques" (1998-2000), se donnait pour objectif de mettre au point les outils et les méthodes permettant de gérer au mieux les retenues pendant les opérations de vidange et de chasses.

Il comportait des recherches sur les processus physiques menées avec des universités partenaires afin d'étudier :

- les glissements de talus de vase (université de Nantes) ;
- les processus d'entraînement de matériaux (université de Stuttgart) ;
- les processus de dépôt et de formation du culot (université d'Aix la Chapelle) ;
- enfin, les processus chimiques de dégradation de la qualité d'eau associée à la mise en suspension des vases à partir des relations obtenues en vidange.

Ces connaissances ont été incluses dans deux codes spécifiques adaptés à la simulation des phénomènes sédimentaires dans les retenues : un code simplifié mobili et un outil plus détaillé courlis, présentés dans l'article Bertier et al, 2002.

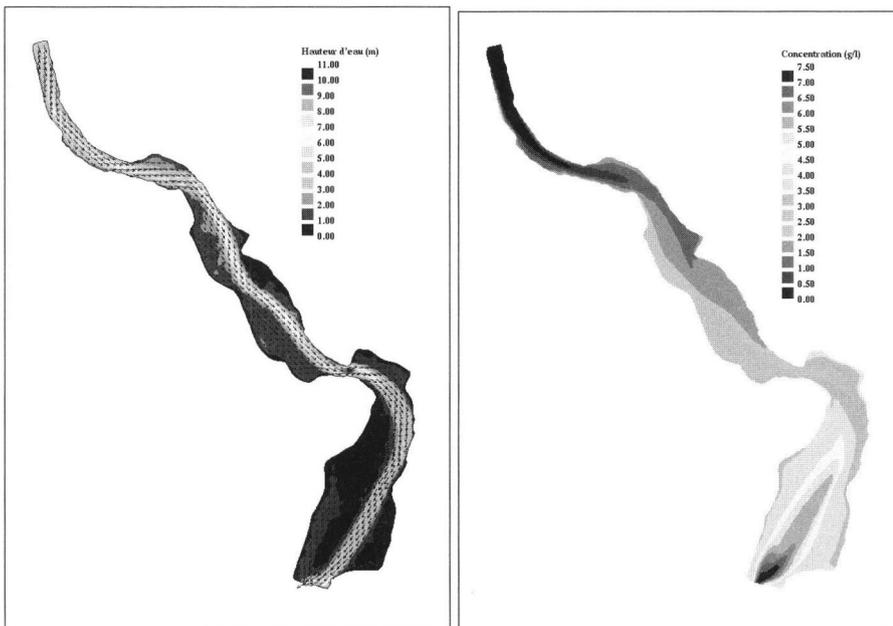


Figure 8 : Modélisation de l'écoulement dans la retenue de l'Escale pendant la crue de janv.1994. A droite le champ des vitesses et les hauteurs d'eau, à gauche les concentrations en limon. On remarque leur augmentation près du barrage avec le creusement du chenal.

- *MOBILI*

Ce code détermine l'état final d'un chenal creusé dans les sédiments après un abaissement du plan d'eau. Il repose sur une description simple de la forme du chenal par un trapèze. Les hypothèses faites permettent de connaître l'état final de la retenue après un temps suffisamment long pour que le chenal n'évolue plus. La Figure 9, ci-dessous, montre un exemple de chenal stabilisé à la fin d'une vidange. Par différence entre la géométrie initiale et son état final, on peut connaître le volume total excavé lors de la vidange ou de la chasse mais pas les états intermédiaires. Cet outil de mise en œuvre simple est utilisé pour des calculs répétitifs de recherche d'optimum économique des conditions de chasses.



Figure 9 : Exemple de chenal créé dans les sédiments par un abaissement du plan d'eau : L'Ondaine dans la retenue de Grangent

- *COURLIS*

Le code COURLIS, repose aussi sur un calcul monodimensionnel de variables de l'écoulement, mais il utilise une description bidimensionnelle des sections et des flux sédimentaires dans la retenue, on a ainsi accès à la modification de la forme du chenal. On peut donc lui coupler un module de mécanique des sols pour reproduire la mise en suspension des vases par éboulement des talus.

Le code simule les processus élémentaires qui participent à la remise en suspension des sédiments, érosion des vases, glissement des talus, formation du culot et sa sortie du réservoir. Il reproduit ainsi l'évolution au cours du temps des concentrations en matière en suspension et calcule également la dégradation de certains paramètres de la qualité d'eau induite par l'érosion des vases.

Cet outil permet la recherche d'un scénario de vidange optimal. C'est à dire la vitesse d'abaissement compatible avec les contraintes techniques des ouvrages, l'hydrologie et les contraintes environnementales comme une concentration maximale en ammoniacque ou en matières en suspension.

Il a été utilisé pour la préparation des vidanges de Génissiat sur le Rhône et de Grangent sur la Loire. La Figure 10 montre la concentration en ammoniacque dans l'eau reproduite sur cette dernière retenue, lors de sa vidange partielle en 1995.

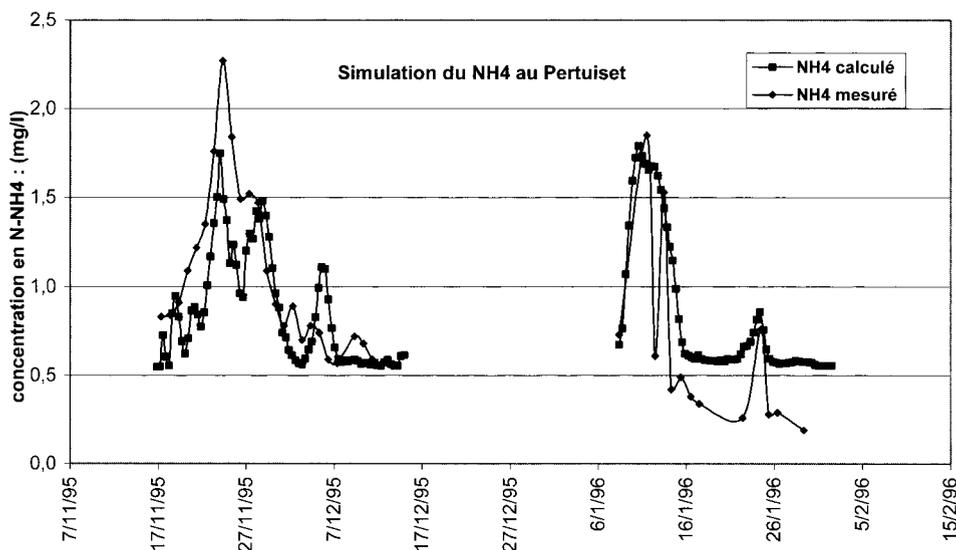


Figure 10 : Simulation de l'évolution de la concentration en ammonium (mg/l de N-NH4) lors de la vidange partielle de la retenue de Grangent en Nov. 1995. Comparaison de la modélisation aux mesures

2.2.3 L'approche à l'échelle du bassin versant

L'application des principes du développement durable aux retenues oblige à envisager la gestion sédimentaire sur de plus longues périodes de temps, à prendre en compte toutes les conséquences de cette gestion sur le long terme et donc d'examiner le problème à l'échelle du bassin versant.

Ce changement d'échelle implique de nouveaux outils. Il ne s'agit pas tant de définir de nouveaux modèles que d'élaborer une plate-forme d'intégration de modèles simplifiés permettant de suivre les matières en suspension depuis le bassin versant puis à travers les divers aménagements jusqu'aux exutoires, en évaluant leur impact sur le milieu et les points d'accumulations, (réservoirs, lit de la rivière...). Une telle approche comporte également un volet économique puisqu'il faut pouvoir évaluer les avantages d'une gestion en terme de gains en sédimentation évitée et de pertes de production.

La chaîne d'aménagements de la Durance (cf. Figure 11) est un exemple de ce type de préoccupations. Les données du problème et l'approche utilisées sont présentées plus en détail au § 4.3. Elle comporte la définition d'objectifs (ou états cibles) pour préciser l'état d'envasement des réservoirs qui satisfait toutes les contraintes. On doit ensuite fixer les règles d'exploitation pour atteindre puis (et surtout) maintenir ces états cibles.

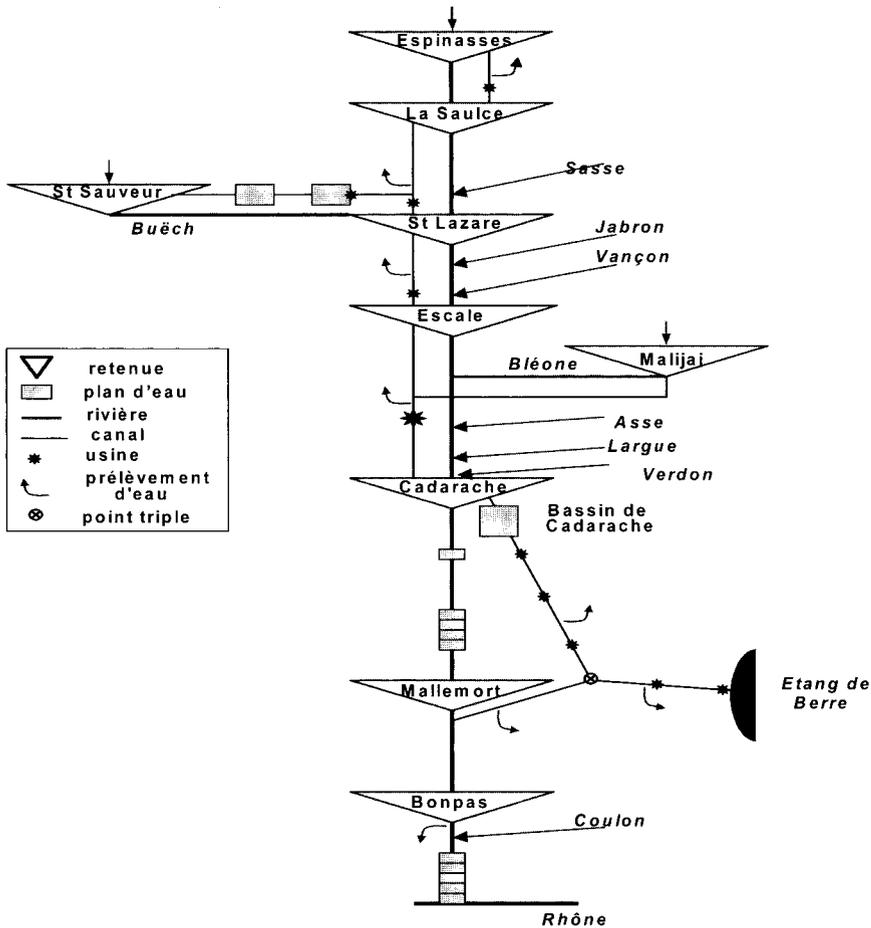


Figure 12 : Structure du modèle de gestion des limons dans le bassin de la Durance. Sur chaque élément du réseau on calcule le transfert de l'eau et des limons, les flèches représentent des points de sortie et les entrées du système où les flux d'eau et de matières en suspension sont calculés

3 Les impacts des chasses

Les impacts environnementaux associés aux opérations de chasse dans le bassin Adour-Garonne ont été étudiés afin de répondre aux objectifs de protection des hydrosystèmes et aux objectifs de gestion durable de l'hydroélectricité.

Un programme quinquennal (1996-2000) d'études a été lancé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF, avec la collaboration de la DRIRE, DIREN, et CSP, et une large diffusion des résultats aux acteurs de l'eau locaux.

Le contexte environnemental dans ce bassin demandait une analyse portant sur deux aspects : les impacts sur l'hydrosystème pendant et après les opérations et l'amélioration du protocole des opérations afin de limiter ces impacts.

La diversité du bassin a orienté le choix des sites étudiés de manière à ce que les résultats soient complémentaires (Figure 13).

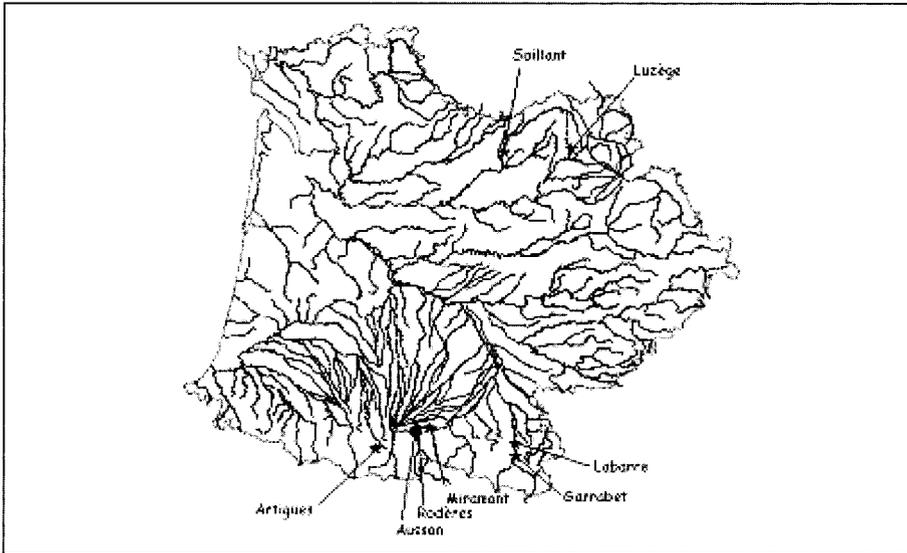


Figure 13 : Localisation des sites d'études sur les transparences d'Adour-Garonne.

Les opérations réalisées dans ce cadre ont été appelées «transparences» dans le sens où le barrage est effacé et laisse la rivière reprendre son écoulement naturel. Cette appellation désigne des opérations de chasse respectant un protocole strict (durée, hydrologie, suivi environnemental) associant les acteurs locaux.

Pour l'évaluation des impacts de ces opérations, un suivi environnemental a été réalisé sur des paramètres physico-chimiques, invertébrés (IBGN adapté), piscicoles, et morphologiques du lit de la rivière.

Chaque site a été suivi par une station témoin et un réseau de mesures aval du barrage avec une fréquence annuelle sur les variables biologiques et physiques, et un suivi en temps réel pour les paramètres physico-chimiques.

L'état d'envasement et le nombre d'opérations réalisées dans chaque site a été déterminant dans les conclusions obtenues par les études. En effet, certains sites ont bénéficié d'un nombre important d'opérations (Artigues) alors que d'autres (la chaîne Ausson-Rodères-Miramont) n'ont pas eu des conditions hydrologiques permettant le déclenchement des transparences. Dans certains sites, comme Labarre et Garrabet, les conditions particulières d'envasement des retenues orientent la réflexion vers des options de gestion préalables aux transparences.

Les résultats généraux du programme d'études montrent que (Gay, 2000) :

- en cours d'opération de transparence, la qualité de l'eau est assez comparable entre les sites et reste convenable compte tenu des besoins piscicoles.
- les valeurs de MES s'apparentent voire sont bien inférieures aux valeurs que l'on observe en crue sur des rivières à fort transport solide (cf 2.1.2).
- les concentrations en oxygène restent toujours satisfaisantes. Les teneurs en azote ammoniacal sont modérées et, compte tenu du pH et de la température, non toxiques (sous forme de NH3) vis à vis des organismes aquatiques. Seuls les paramètres tests de la charge en matières oxydables sont très élevés, mais sans conséquence sur la vie aquatique.

A titre d'exemple, les courbes de MES et NH_4^+ pour le premier jour d'opération de transparence à Garrabet (Ariège) en mai 1999 montrent les niveaux en aval immédiat du barrage par rapport à ceux de la station témoin amont (Figure 14).

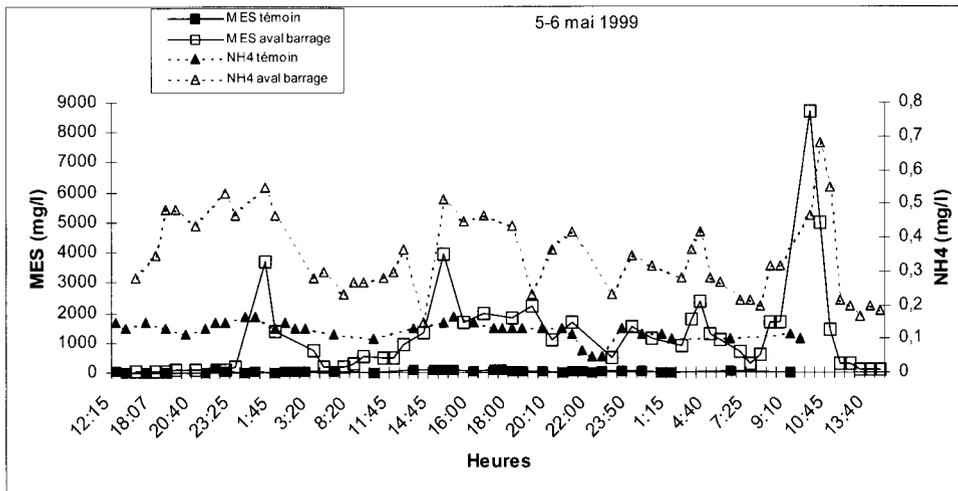


Figure 14 : Suivi en temps réel de MES et NH_4 de la transparence à Garrabet (Ariège) en 5-6 mai 1999. Source : AQUASCOPE, 1999.

En règle générale, les concentrations atteintes durant les opérations de transparence ne sont pas de nature à impacter directement et durablement les populations animales en place. Néanmoins, selon l'état d'accumulation des sédiments fins dans la retenue, les MES peuvent agir sur certaines écophases (frai) de certaines populations piscicoles.

De même, les mesures sur les invertébrés montrent une dérive plus accentuée des organismes pendant les transparences et puis une recolonisation. Ce processus est similaire à ce qui se passe lors d'une crue naturelle.

Les conclusions sur le peuplement piscicole sont les plus difficiles à établir compte tenu de la variabilité des milieux et des populations rencontrées dans le cadre de ces 5 ans d'études.

Sur Artigues, les opérations paraissent globalement neutres. Par ailleurs, l'apport d'éléments grossiers est favorable à l'installation de zones de frayères. L'absence d'effets sensibles sur le long terme des opérations de transparence est probablement favorisée par un milieu est très productif, des zones de refuge et de frai nombreuses, des déplacements d'individus peu entravés par des obstacles.

Sur les autres sites, les impacts majeurs concernent l'introduction des espèces non électives (de la retenue) et les risques de colmatage des frayères. Le déplacement et la reproduction des poissons permettent le retour progressif à une situation antérieure, plus ou moins rapide et complet, selon que l'état écologique du cours d'eau est plus ou moins bon.

Ces résultats ont été largement utilisés pour caler les protocoles de chaque opération afin de limiter les impacts sur le système aquatique. La maîtrise des transparences passe aujourd'hui par un contrôle hydrologique et environnemental tenant compte des spécificités du milieu aquatique concerné.

Il ressort de toutes ces études que l'idée même de résoudre toutes les problématiques liées au transport solide de manière univoque et définitive n'a pas de sens. La logique des boucles d'amélioration doit lui être préférée sous réserve qu'elle conduise non pas à l'inflation des mesures et études mais à une rationalisation des moyens mis en œuvre. C'est ainsi que sur certains sites (Basse Isère par exemple), la consigne de chasse est révisée périodiquement, en renforçant certains points du suivi mais aussi en en diminuant d'autres concernant des processus bien connus ou peu informatifs.

4 Vers de nouvelles règles de gestion

La recherche d'une gestion efficace du transport solide pour les aménagements complexes entraîne la définition de nouvelles règles qui s'appuient sur la notion d'Etats Cibles d'envasement. Cet axe implique une vision nouvelle des exploitants de barrages. Economiquement, les sédiments sont considérés comme un passif pour la gestion alors que l'eau est, elle, toujours considérée comme un actif. Après avoir étudié chaque retenue et avoir défini les objectifs pour chacune d'entre elles, la chaîne est alors analysée globalement pour aboutir à la définition de nouveaux modes de gestion. Ces nouvelles consignes d'exploitation peuvent consister à des transparences régulières ou en chaîne, à des fermetures de certaines prises d'eau ou à l'abaissement de la cote des retenues à certaines périodes ou encore à la réalisation de curages localisés... mais toujours avec une vision long terme.

4.1 Exemple des transparences en Adour-Garonne

La gestion de sédiments dans les retenues du bassin Adour-Garonne a évolué d'une gestion par chasses vers la gestion par transparences. Les sites concernés se voient délivrer un arrêté préfectoral avec les consignes d'opération inspirées du programme d'études Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF :

- conditions hydrologiques de crue annuelle, plutôt en décrue ;
- opération hors période de fraie (selon la faune piscicole présente)
- suivi physico-chimique en temps réel (paramètres à définir selon les spécificités du milieu) ;
- arrêt de l'opération en cas de dépassement prolongé des paramètres physico-chimiques ;
- durée de l'opération de 3 jours minimum.

Un travail de concertation, qui réunit annuellement les acteurs locaux, permet une amélioration continue du protocole des opérations et une sensibilisation générale à l'importance de cette gestion durable des sédiments.

4.2 Exemple de gestion des prises complémentaires de la Coche

Située dans la vallée de la Tarentaise, la cuvette de la Coche est prévue pour alimenter, en haute chute, l'aménagement mixte turbinage-pompage de la centrale de la Coche. La cuvette est remplie par adduction gravitaire d'affluents rive gauche du Doron de Bozel ou de l'Isère, et par pompage, aux heures creuses, dans la retenue d'Aigueblanche située à l'aval. Ces deux modes d'exploitation, et principalement l'apport par les adductions amont, sont la cause d'un dépôt de sédiments dans la cuvette, entraînant une perte de sa capacité utile et de sa capacité de décantation d'où une usure importante des machines hydrauliques de l'aménagement.

Une étude a montré qu'après une opération de curage fort coûteuse, il était possible de limiter les apports solides en gérant les prises d'eau en temps réel.

Pour rétablir durablement cette capacité de décantation, EDF a donc décidé d'extraire 49 000 m³ de sédiments par une drague. Les sédiments sont rejetés à l'aval avec une concentration en MES inférieure à 2 g/l.

Pour maintenir l'état d'envasement obtenu après les travaux de 2002, les prises d'eau principales ont été équipées de turbidimètres pour gérer en temps réel les apports solides : le turbidimètre permet de déclencher la fermeture de la prise d'eau et de rétablir l'écoulement naturel dans la rivière dès que la concentration en MES dépasse une valeur fixée. Ce nouveau type d'exploitation devrait contribuer à limiter d'une manière considérable les apports solides dans la cuvette et donc son envasement (Figure 15).

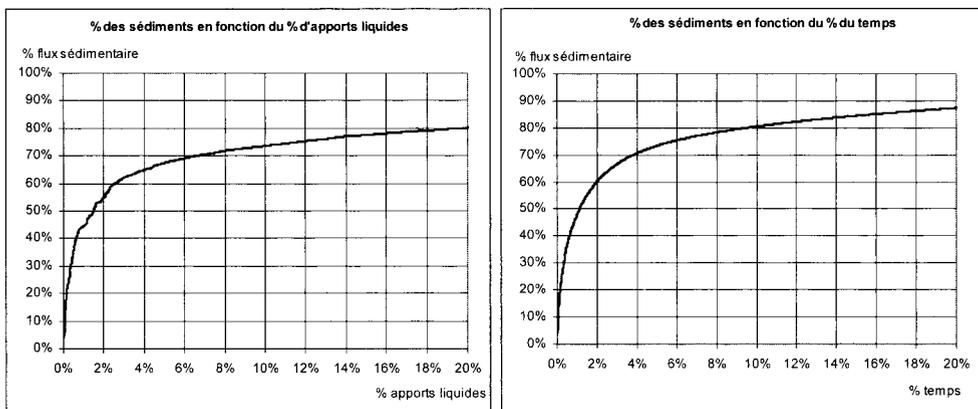


Figure 15 : Relation entre les apports sédimentaires et le temps ou les apports liquides sur une des prises principales de la cuvette de la Coche

4.3 Exemple d'aménagements complexes en chaîne : la Durance

L'aménagement agro-industriel de la Durance comprend, à l'aval de Serre-Ponçon, sept retenues intermédiaires d'Espinasses à Bonpas, auxquelles il faut ajouter, la retenue de Malijai sur la Bléone et la retenue de Saint-Sauveur sur le Buëch.

La Durance ainsi que ses affluents sont des rivières à fort transport solide, avec une variabilité exacerbée résultant de la combinaison d'une hydrologie typique des systèmes méditerranéens et de celle des phénomènes de transport solide.

La configuration des retenues et leur mode de gestion n'a pas permis jusqu'à ces dernières années la réalisation de transparences des barrages vis à vis du transport solide. Par conséquent, une quantité importante de sédiments est aujourd'hui stockée dans les retenues.

Retenue	Année de mise en service	Capacité initiale (hm3)	année de la bathymétrie	Volume envasé (hm3)	% comblement
SAINT-LAZARE	1976	6,2	1982	2,8	45
			1986	3,8	61
			1992	4,1	66
			1994	2,9	47
			2000	4,4	71
			2001	3,9	62
L'ESCALE	1963	15,7	1980	9,7	62
			1981	11,2	71
			1986	12,0	76
			1991	12,4	79
			1993	11,8	75
			1994	10,4	66
			2000	11,2	71
			2002	12,3	78

Tableau 1 : volumes d'envasement des retenues de la Durance

En 1999 EDF a décidé d'engager une étude dont les objectifs étaient de réaliser un état des lieux complet de l'état d'envasement des retenues sur la Durance en identifiant les conséquences engendrées par cet état. Ce diagnostic croisé avec les résultats de l'étude globale menée par le Syndicat Mixte d'Aménagements de la Vallée de la Durance proposera ensuite des états cibles et durables pour les retenues, tout en répondant aux problématiques des tronçons de rivière entre les retenues. Le but est d'aboutir à la mise en place d'une gestion globale de la rivière intégrant les différentes problématiques et rétablissant le transit solide amont aval.

4.3.1 Effets de l'envasement des retenues

Le recensement des conséquences et des contraintes induites par l'envasement des retenues amène à identifier des effets sur les ouvrages ou leur gestion :

- les zones inondables au bord des retenues le sont plus fréquemment,
- la réduction des capacités utiles des retenues et la limitation des capacités de marnage induisent un manque à gagner,
- des difficultés de gestion apparaissent : en crue, des cotes réglementaires deviennent délicates à maîtriser, des opérations de maintenance plus fréquentes sont nécessaires, certains usages subissent des perturbations,
- la protection (ZNIEFF, ZICO) des roselières et milieux humides présents sur les zones envasées de la retenue induisent de nouvelles contraintes.

4.3.2 Approche du problème

L'approche à décliner devait répondre aux objectifs suivants :

- le traitement des dysfonctionnements ou des risques pour les tiers.
- la nécessité d'une approche globale (Weiss,1997) entre les retenues d'une part et les démarches externes d'autre part : étude globale Durance (Sogreah,1998), contrats de rivière Buëch, Durance, réflexions sur la Bléone (Lefort,1997 ; Sogreah 2003), le Sasse (Kouliniski,2002), l'Etang de Berre...
- la volonté que les états cibles des retenues ainsi que les solutions proposées soient des aménagements durables.

4.3.3 Méthodologie

La méthodologie qui a été mise en place comporte quatre phases :

- Phase 1 : Etat des lieux : recensement des conséquences de l'envasement, établissement d'un programme de bathymétries, analyse des actions à prioriser, analyse des études déjà réalisées sur ce sujet sur la Durance.
- Phase 2 : Diagnostic : Réalisation des études dont le besoin a été identifié en phase 1 afin de mieux quantifier les conséquences de l'envasement.
- Phase 3 : Définition d'Etats Cibles pour les retenues et tronçons de rivières : c'est à dire des états d'envasement et d'engrèvement des retenues compatibles avec le respect des obligations, des contraintes d'exploitation, des contraintes environnementales (ZICO, ZNIEFF, Natura 2000, DCE) et avec les objectifs du contrat de rivière Durance.
- Phase 4 : Définition des moyens pour atteindre les Etats Cibles et pour les rendre Durables : modification de consignes, mise en place d'ouvrages, réalisation de curages, changement de pratiques d'exploitation, projet d'entretien de roselières.

Les résultats obtenus sont régulièrement présentés et proposés à la validation du Comité Technique du Contrat de Rivière Durance.

4.3.4 Réalisations actuelles

- Etats des lieux et diagnostic pour chaque retenue

Chaque retenue est décrite avec les différents ouvrages pour lesquelles l'envasement a un impact. Ces conséquences ont ensuite été quantifiées afin de mieux appréhender les risques leur fréquence et ainsi prioriser les actions. Lors de cette première phase de travail il est apparu essentiel de différencier les problématiques graviers et limons.

- Rappel des objectifs principaux du contrat de rivière Durance

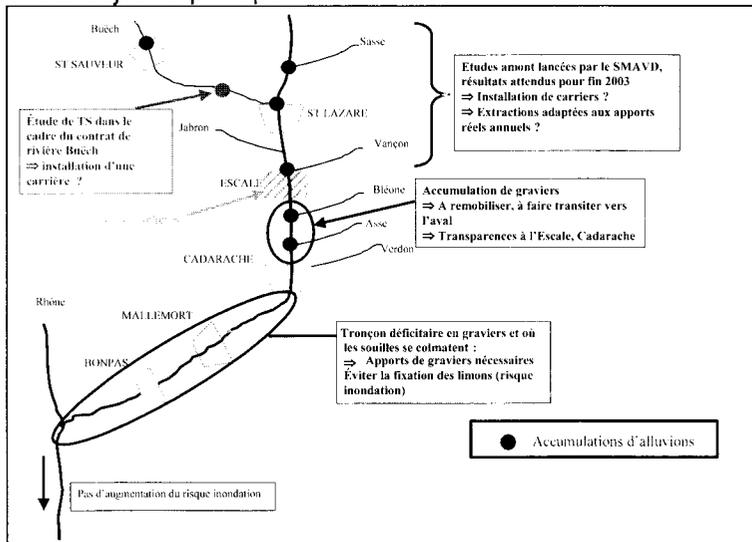


Figure 16 : Carte synthétisant les principaux objectifs du contrat de rivière Durance par rapport à la problématique transport solide

- Evolution globale de la gestion des barrages

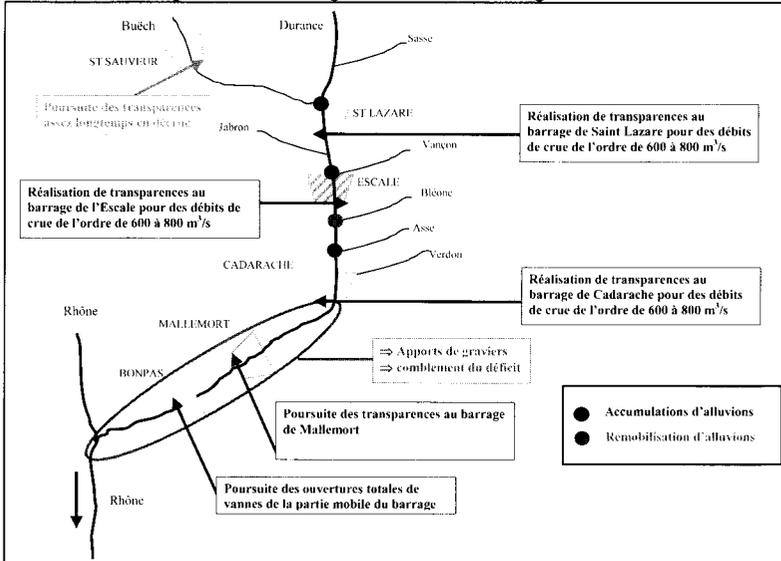


Figure 17 : Carte synthétisant les évolutions de gestion proposées par EDF pour l'exploitation de la chaîne Durance en période de crue

Les premiers résultats du programme permettent d'estimer la morphologie future des retenues avec ces nouveaux modes d'exploitation (cf résultats du §2.2). Pour les retenues de Saint Lazare et l'Escale, l'analyse morphologique indique que le chenal aura une section minimale qui est imposée par le régime hydraulique dominant lié à la production hydroélectrique c'est à dire par un débit d'environ 240 m³/s et une cote de retenue normale.

La réalisation des transparences impliquera l'arrêt des usines hydroélectriques de la chaîne Durance pendant toute la phase d'ouverture complète du barrage alors que cette phase correspondait à une période de production. Ces opérations auront donc un coût énergétique élevé mais réduiront les coûts d'exploitation. Ces gains/pertes économiques seront quantifiés par le couplage du modèle hydro-sédimentaire avec un modèle économique de la chaîne Durance.

- Premiers objectifs sur les retenues

Les premiers objectifs sur la retenue de l'Escale par rapport à la problématique limons sont associés à la réalisation de transparences (pour maintenir l'état d'envasement, diminuer les risques inondation, préserver les roselières), à la mise en place d'un organe mécanique à l'entrée du canal d'Oraison pour permettre ces opérations, à la remobilisation des atterrissements aux confluences de la Bléone et de l'Asse.

Les premiers objectifs par rapport à la problématique graviers, sur St Lazare, consistent à évaluer les risques inondations de certains quartiers de Sisteron, à réaliser des curages ciblés à la confluence Buëch/Durance, à pérenniser la situation soit par l'établissement d'extractions localisées adaptées aux apports solides constatés soit par des aménagements de protection.

- Définition des états durables sur les tronçons

La méthodologie proposée comporte trois phases principales :

- l'établissement d'un constat d'état par rapport au transport solide, c'est à dire les zones de dépôts, de remobilisation et leurs caractéristiques principales. Il sera défini à partir des aspects physiques et biologiques.
- la définition des hypothèses d'évolution court et long terme, ensuite itération avec les objectifs des retenues afin d'obtenir une base de suivi. Utilisation du retour d'expérience des différents suivis de chasses réalisés au sein d'EDF (Gay, 2002 : conclusions des transparences réalisées sur Artigues).
- après validation du comité technique du contrat de rivière Durance, la définition du protocole de suivi qui sera à insérer dans l'Observatoire Durance.

5 CONCLUSIONS

Malgré plus d'un siècle de mesures et d'études, le transport solide et l'envasement des retenues reste une problématique majeure de l'établissement de barrages, à la fois par ses conséquences sur la sûreté, sur l'économie et sur l'environnement. Si les aspects sûreté sont maîtrisés par des contrôles réguliers, si les conséquences environnementales sont mieux maîtrisées par un encadrement réglementaire de toutes les opérations importantes, il n'en reste pas moins que les impacts du transport solide sur les aménagements hydrauliques sont souvent abordés site par site comme une collection de problèmes localisés.

Les objectifs de développement durable, une vision plus patrimoniale des aménagements conduisent aujourd'hui à traiter les apports sédimentaires de manière très régulière, au plus près de l'événement qui les génère et en privilégiant la restitution des apports solides au milieu aval.

Les progrès de la métrologie et de la modélisation autorise des approches plus globales à l'échelle d'une vallée, approches basées 1/sur des séries d'apports liquides et d'apports solides reconstitués, représentatifs de la variabilité de ces phénomènes et 2/sur des modélisations physiques du comportement des sédiments. De nouvelles règles de gestion peuvent alors être simulées sur le long terme pour en tester toutes les conséquences.

Les options de gestion sont rarement très nombreuses sur un aménagement donné, mais leur combinaison à l'échelle d'une vallée offre des perspectives sous réserve de s'inscrire dans la durée. L'abaissement de la cote à certaines périodes, la restitution des eaux chargées en MES au droit des adductions complémentaires, la gestion régulière par chasses, la réalisation d'extraction localisées,... sont autant de moyens à étudier de manière complémentaire en identifiant les conséquences amont-aval sur la rivière et sur les autres aménagements.

Les opérations de chasses ou transparences restent toujours l'outil de gestion privilégié sur les retenues à faible temps de séjour, dans la mesure où l'opération est maîtrisable par le contrôle de paramètres environnementaux en temps réel, ses impacts réels étant quantifiables par un suivi biologique (si on distingue bien les impacts propres à la crue sur laquelle elles sont réalisées).

Bibliographie :

- AQUASCOPE, 1999. Barrages de Garrabet et Labarre sur l'Ariège. Résultat du suivi des paramètres physico-chimiques lors de l'opération de transparence de mai 1999. Mission Technique Commune Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF. 61p.
- Berthier A., Cabanne J., Douillet G., Lambert A., Raud J., 1970 - Commission internationale des grands barrages - Dixième Congrès des Grands Barrages - Montréal - Quelques problèmes posés par la création de barrages sur une rivière transportant des débits solides.
- Bertier Ch., Bouchard J.-P., Dumond L. 2002. One dimensional model for reservoir sedimentation management - Proc of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2002. 3-6 September 2002. Louvain la Neuve Belgium Bousmar & Zech (eds.). Balkema ISBN 90 5809 509 6
- Cailmail X., Poirel A., Lallement C., Clair M. - 1993 - Colloque SHF - Comité technique Session n°148 - Expérience acquise à EDF en matière de chasses de retenues - Modélisation du transit des MES sur l'aval
- CTGREF - 1975 - Suivi des chasses des retenues de Verbois et de Genissiat sur le Rhône (Juin 1975) - Rapport d'étude
- EPTB Garonne, 2003 : Etude de diagnostic de la retenue de Plan d'Arem - Rapport d'étude
- Fiandino M., janvier 2000 - Evaluation des apports sédimentaires en provenance des principaux fleuves vers l'Étang de Berre (2^{ème} rapport intermédiaire) - Université Provence - Safege-Cetiis
- Garçon R., 1996 : Préviation opérationnelle des apports de la Durance à Serre Ponçon à l'aide du modèle MORDOR - La Houille Blanche n°5 - 1996
- Garric J., Migeon B., Vindimian E., 1990 : Lethal effects of draining on brown trout. A predictive model based on field and laboratory studies. Water Research Vol 24-1 pp 59-65.
- Gautheron A., 1995 : Elaboration d'un modèle explicatif des flux de MeS dans l'Isère à Grenoble. Mémoire de DEA - ENSHMG-LTHE.
- Gay Environnement, 2002. Etude de l'impact sur l'hydrosystème de la gestion adaptée des barrages au transport solide des rivières - Bilan de 5 années de suivi des opérations de transparence (1996 - 2000). Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF. 71p.
- GRPH Alpes, 1967 : L'alluvionnement des retenues : Le Sautet - Document EDF
- GRPH Alpes, 1974 : Suivi de la chasse de Beauvoir et St Hilaire (4/1974) - Document EDF
- GRPH Alpes, 1977 : Suivi de la chasse de Beauvoir et St Hilaire (6/1977) - Document EDF
- Koulinski V. 2002 - Expertise hydraulique du Sasse sur la commune de Vallernes, DDAF 04
- Lefort P., Koulinski V., août 1997 - la Bléone à Malijai - expertise hydraulique - Syndicat Mixte Aménagement Bléone
- Maurel F., Bertier C., Hervouet J.M. 1998 : 2D numerical modeling of sediment resuspension in reservoirs. in Babovic & Larsen (eds), Hydroinformatic'98: 191-197. Rotterdam. Balkema.
- Meybeck M., Pasco A., Ragu A. - 1994 - Etude Inter Agence n° 28 - Evaluation des flux polluants dans les rivières : pourquoi, à quel prix ?

Meybeck, M., L. Laroche, H. H. Dürr, and J. P. M. Syvitski. 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global Biogeochem. Cycles* (in press).

Poirel A., 1998 : Essai de modélisation des flux solides de l'Isère à Grenoble – Relations avec l'hydroclimatologie – La Houille Blanche n°5/6 -1998

Poirel A., 2001 : La gestion par chasses (1) : retour d'expérience sur quelques aménagements alpins – La Houille blanche n°6/7 – 2001 – pp55-61

Rambaud J., Clair M., Sandret J., Frau J.P., Khalanski M., Ricard C. - 1988 - Commission internationale des grands barrages - Seizième Congrès des Grands Barrages - San Francisco - Expérience acquise dans les vidanges de retenues par Electricité de France et la Compagnie Nationale du Rhône.

Rapport de la Commission Mondiale des Barrages – Novembre 2000

Raschad S.M., Ismail M.A., 2000 : Environmental-impact assesement of hydro-power in Egypt – *Applied Energy* (65) 2000 pp 285-302

Remenieras G., Braudeau G. : 1951 - Quelques observations sur l'alluvionnement dans les réservoirs français - Congrès des Grands Barrages de New Delhi – Actes du Congrès.

Sogreah Ingénierie, juin 1998 – octobre 1999 – Etude hydraulique et sédimentologique de la moyenne et basse Durance – diagnostic – Syndicat Mixte d'Aménagement Vallée de la Durance – Etude globale

Sogreah Ingénierie, novembre 2001 – Etude du transport solide sur le Buëch aval – DDE 05

Sogreah Ingénierie, février 2003 – Schéma de restauration et de gestion de la Bléone et de ses affluents – Syndicat Mixte d'Aménagement de la Bléone

Weiss Patrick, 1997 – sédimentation des retenues de l'aménagement Durance/Verdon : bilan et solutions étudiées – EDF/ENERGIE MEDITERRANEE – conférence de Montréal – septembre – octobre 1997

Wilhem I., 1913, La Durance. Etude de l'utilisation de ses eaux et de l'amélioration de son régime par la création de barrages. Edition Lucien Laveur, Paris.



Analyse des impacts sur le milieu aquatique de retenues de soutien des étiages dans le Sud-Ouest de la France.

Retour d'expérience de la CACG

Impact assessment of river recharging on water environment in the South-West of France.

Lessons drawn from CACG experience

Daniel Boubée
CFGB / CACG

Antoine Hétier
CACG

Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
BP 449, 65004 Tarbes Cedex
tél. : 05 62 51 71 49
fax : 05 62 51 71 30
E. mail : central@cacg.fr

Résumé

Plusieurs années de suivi du fonctionnement de différents réservoirs destinés à la réalimentation de cours d'eau dans le Sud-Ouest de la France ont permis d'apporter des éléments objectifs quant à la nature et à l'importance des impacts générés par ce type d'ouvrage. Ces impacts (hydrologiques, physico-chimiques et piscicoles) apparaissent modérés, en termes d'intensité et d'extension géographique. Leur connaissance débouche sur des mesures simples de gestion opérationnelle, et devrait permettre de mieux orienter les choix de conception ou d'équipement des ouvrages à construire.

Abstract

The several year monitoring of various reservoirs built for river recharging in the South-West of France has produced objective elements as for the nature and importance of the impacts generated by this type of dams. Such impacts (hydrological, physicochemical and piscicultural) appear moderate, in terms of intensity and geographic extension.

Their identification leads to simple decisions of operational management, and should allow better choices in the design or equipement of future works.

Mots clés : soutien des étiages, impacts sur le milieu aquatique, gestion

Keywords : *river recharging, impacts on aquatic environment, management*

1 Présentation

La Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne gère dans le Sud-Ouest de la France un parc important de barrages-réservoirs destinés à la réalimentation des cours d'eau (plus de 2 000 km de rivières réalimentées à partir d'une trentaine de réservoirs de 1 à 25 millions de mètres cubes). Sur ce type particulier de retenues, plusieurs études ont été entreprises en vue de mieux cerner l'évolution de la qualité des eaux stockées, et les répercussions éventuelles vers l'aval des cours d'eau :

- « *Qualité des eaux des rivières et retenues gasconnes* » / CACG 1991/1994. Cette étude a porté sur les 4 principaux réservoirs de piémont intégrés au système Neste,
- « *Impact des barrages de réalimentation sur la qualité des eaux* » / CARA – 1995/1997. L'étude a permis le suivi de 3 réservoirs de réalimentation de l'Adour
- « *Qualité de réservoirs non réalimentés par la Neste* » / CACG -1999/2000. Cette dernière a concerné 4 réservoirs de moyenne capacité, suivis au cours d'un cycle annuel.

Les retours d'expérience permis par ces études sont présentés ci-après.

2 Impacts hydrologiques et hydrauliques

Pour que leur volume soit en adéquation avec les besoins à satisfaire tout en ayant un remplissage annuel garanti, les retenues sont, statistiquement, implantées au premier dixième du linéaire total de la rivière aménagée et interceptent 5% de son bassin versant global. Les incidences sur les écoulements sont analysées ci-après en distinguant les trois phases du fonctionnement des réservoirs.

2.1 Phase de remplissage

Cette phase peut durer de quelques semaines à quelques mois, en fonction de l'importance des restitutions estivales et automnales effectuées durant l'année précédente à partir de la retenue, et des conditions hydrologiques hivernales et printanières.

Au cours de cette période, le débit de la rivière au pied de la retenue est maintenu à hauteur du débit réservé, pour lequel on retient, hors contrainte particulière, la valeur plancher introduite par la « loi Pêche » (soit 1/10^è du module). Dans les conditions du Sud Ouest, on constate que cette valeur

correspond sensiblement à la valeur du débit « ordinaire » de la rivière²¹ : de ce fait, les incidences hydrologiques en phase de remplissage correspondent essentiellement au stockage des crues.

En aval de la retenue, et avec l'augmentation rapide de la superficie du bassin versant, l'interception des écoulements, au delà de deux fois le bassin amont, ne donne plus lieu à une modification sensible des conditions hydrologiques et hydrauliques.

2.2 Phase d'étalement

Lors de la phase d'étalement, les volumes parvenant en amont du réservoir sont pratiquement intégralement restitués en aval ; l'incidence sur les débits est minime, et correspond seulement au phénomène de laminage des crues par stockage temporaire sur la surface du plan d'eau.

2.3 Phase de restitution

Les restitutions sont effectuées en période d'étiage (schématiquement de juillet à septembre, plus rarement au delà), afin de subvenir aux usages consommateurs, tout en assurant le maintien, en un point de consigne « aval », d'un débit garantissant la salubrité du cours d'eau sur tout le linéaire réalimenté.

Cette réalimentation constitue, par référence aux conditions naturelles, la principale modification apportée au fonctionnement du cours d'eau, avec notamment un profil de débit décroissant de l'amont (pied de l'ouvrage de réalimentation) vers l'aval (point de consigne).

Au cours de cette phase, les lâchers d'eau effectués pourront conduire à faire transiter sur les premiers kilomètres du cours d'eau réalimenté un débit maximal de l'ordre de 250 l/s par million de m³ stocké (valeur pouvant être atteinte durant les quelques jours de pointe des prélèvements en eau d'irrigation).

On constate à l'expérience que cette valeur maximale du débit de réalimentation n'est pas exceptionnelle par rapport aux valeurs naturelles des débits de crue ou de hautes eaux de fréquence courante sur la rivière, débits qui ont contribué à façonner le gabarit du cours d'eau. A de rares exceptions près (cas de petits cours d'eau devenus très encombrés, voire instables à la suite d'un manque d'entretien), le transit des débits de réalimentation s'effectue sans aucune difficulté, et sans nécessité de recourir à des travaux de nettoyage ou de confortement des berges.

²¹ Débit habituellement constaté en hiver et au printemps, sur les périodes séparant les divers épisodes de crues.

3 Impacts sur la qualité des eaux

3.1 Qualité des eaux stockées

Le fonctionnement physico-chimique des réservoirs est essentiellement régi par les influences conjuguées du cycle thermique annuel, et de leur niveau trophique.

3.1.1 Cycle thermique

L'évolution saisonnière des températures atmosphériques détermine pour la masse d'eau stockée un cycle thermique en quatre étapes :

- **une période hivernale** au cours de laquelle la température de l'eau stockée est homogène sur toute la colonne d'eau, à des valeurs équivalentes ou légèrement inférieures à celles des eaux courantes (5 à 7°C en Gascogne),
- **une période printanière** au cours de laquelle s'établit un gradient thermique décroissant entre les eaux de surface (dont la température est de l'ordre de 15°C) et les eaux de fond (températures d'environ 10°C),
- **une période estivale** caractérisée par une stratification thermique marquée et durable. Celle-ci tend à séparer la masse d'eau en deux tranches distinctes, entre lesquelles les échanges chimiques par diffusion sont ralentis ou interrompus, et dont l'évolution physico-chimique devient de ce fait divergente. Les suivis effectués permettent de retenir empiriquement que l'épaisseur de la tranche d'eau de surface représente la moitié de la profondeur moyenne à retenue pleine ; la température peut y atteindre ou dépasser 22°C. La tranche d'eaux profondes présente dans sa partie supérieure un gradient thermique rapidement décroissant, éventuellement prolongé (dans le cas de réservoirs de grande profondeur) par une zone de températures homogènes, et équivalentes aux températures printanières,
- **une période automnale** où, sous l'effet conjugué du refroidissement des températures atmosphériques et du soutirage des eaux de fond (restitutions), on observe progressivement une homogénéisation des caractéristiques thermiques des tranches d'eau.

3.1.2 Niveau trophique des réservoirs

Les travaux de recherche notamment conduits par l'OCDE ont mis en évidence que le niveau trophique des réservoirs est essentiellement déterminé par la richesse des eaux d'alimentation en éléments nutritifs, et tout particulièrement en

phosphore ; la notion de temps de séjour des eaux intervient en tant que facteur pondérateur de cette richesse nutritive²².

Le parc de retenues gérées par la CACG se caractérise, du fait de leur fonction de réalimentation, par des temps de séjour relativement brefs (fourchette de 1.1 à 1.4 années, correspondant à l'utilisation annuelle moyenne de 70 % à 90 % de la capacité totale de la retenue). Compte tenu de l'implantation de la plupart des ouvrages dans des zones relativement peu exposées à la pollution par le phosphore, ces retenues se situent pour la plupart à un niveau trophique mésotrophe à eutrophe²³. On notera que le phosphore y constitue systématiquement le facteur limitant du développement des peuplements phytoplanctoniques, constituant le premier étage de la production biologique.

Un tel niveau trophique permet le développement non excessif de peuplements planctoniques, s'organisant en plusieurs vagues annuelles. Ces cycles de croissance et de mort du phytoplancton contribuent à renforcer la différenciation physico-chimique observée entre les tranches d'eau au printemps et en été :

- la tranche d'eaux de surface est dominée par les mécanismes d'assimilation chlorophyllienne. On y observe donc la production d'oxygène dissous et la consommation du carbone et des sels dissous, ce qui tend à induire une élévation du pH, ainsi qu'une diminution de la conductivité et des teneurs en nutriments (phosphates, nitrates, silice...),
- la tranche d'eaux profondes est dominée par les mécanismes de décomposition bactérienne, s'accompagnant d'une consommation d'oxygène dissous, et d'une augmentation des teneurs en composés organiques. Dans la mesure où le gradient thermique estival s'oppose au renouvellement du stock d'oxygène par diffusion depuis la surface, on aboutit généralement dans le courant de l'été à une situation d'anoxie totale dans les eaux profondes. Les composés chimiques résultant de la dégradation de la matière organique restent sous forme réduite (augmentation progressive des concentrations en ammonium et diminution des concentrations en nitrates, dont l'oxygène est utilisé par certaines bactéries) ; on peut assister à la libération de composés minéraux (fer, manganèse, phosphore...) précédemment immobilisés sous forme oxydée dans les sols noyés.

De façon globale, la qualité de la tranche d'eau de surface peut être jugée comme bonne ; celle des eaux profondes est principalement pénalisée par le déficit en oxygène dissous, et par l'élévation des teneurs en composés réduits (qui ne concerne cependant que la partie de cette tranche d'eau à proximité immédiate du fond).

²² Selon les équations de régression établies par l'OCDE, à richesse en phosphore égale, un temps de séjour prolongé tend à abaisser le niveau trophique du réservoir.

²³ L'échelle des niveaux trophiques proposée par l'OCDE s'organise en cinq niveaux : ultra-oligotrophe, oligotrophe (« qui nourrit peu »), mésotrophe (« qui nourrit moyennement »), eutrophe (« qui nourrit bien ») et hyper-eutrophe.

3.1.3 Cas particulier du premier remplissage

Lors du premier remplissage de la cuvette, la minéralisation de la matière organique contenue dans les sols noyés conduit à une très forte consommation de l'oxygène dissous dans les eaux au contact du fond. Cette minéralisation s'accompagne de la mise en solution de composés chimiques caractéristiques des milieux réducteurs, comme décrit précédemment, mais de façon plus intense, et aboutit habituellement à une dégradation sensible de la qualité des eaux stockées dans les tranches profondes.

Des précautions particulières peuvent être prises pour limiter l'ampleur de ces phénomènes, qui ne se reproduisent qu'exceptionnellement au delà du premier cycle remplissage / vidange.

3.2 Qualité des eaux restituées

De façon générale, la qualité des eaux restituées en aval d'un réservoir tend à refléter celle des eaux stockées, compte tenu à la fois des évolutions saisonnières, et de l'horizon dont ces eaux proviennent (eaux de fond dans la plupart des cas, eaux de surface lors des épisodes de déversement). Toutefois :

- le passage dans les organes de vidange introduit certaines modifications des composantes chimiques des eaux restituées,
- ces composantes continuent d'évoluer vers l'aval en fonction des caractéristiques physiques du cours d'eau et de l'importance du débit restitué,
- l'influence du réservoir diminue également avec la distance, à mesure que l'augmentation de la surface du bassin versant s'accompagne de nouveaux apports naturels.

Ces considérations, confirmées par l'expérience, amènent à distinguer, en ce qui concerne la qualité des eaux restituées, les effets « locaux » (perceptibles sur un tronçon de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres), et les effets « globaux » (considérés à l'échelle du cours d'eau réalimenté).

3.2.1 Effets locaux

3.2.1.1 Températures

Les effets thermiques observables en aval d'un réservoir se traduisent (par comparaison au cycle saisonnier des températures d'eaux libres) par des écarts de sens et d'ampleur variable en fonction de la saison et de l'origine des eaux restituées. D'après les résultats obtenus au cours des 3 années de suivi des principales retenues gasconnes, les écarts thermiques les plus conséquents entre l'amont et l'aval immédiat d'un réservoir peuvent être observés :

- en fin de printemps, lors des épisodes de déversement : les eaux restituées, provenant de la surface du plan d'eau, peuvent alors être sensiblement plus chaudes que celles s'écoulant en amont (écarts instantanés de 5 à 6 °C au maximum),
- au début de la période estivale, lors de la restitution d'eaux de fond dont la température est alors (du fait de la stratification thermique) nettement plus fraîche que celle des eaux libres ; l'écart maximum instantané peut également atteindre 5 à 6°C.

En dehors de ces périodes particulières, c'est à dire de la fin de l'été au début du printemps suivant, les écarts thermiques observables seront de faible ampleur ; ils tendent à se compenser au pas de temps annuel, où l'on n'observe qu'une tendance modérée au réchauffement du cours d'eau aval (+ 1°C en moyenne).

Au cours du transit vers l'aval, la température de l'eau évolue rapidement vers une température d'équilibre dictée par les conditions atmosphériques et certaines conditions stationnaires (ombrage). Cet équilibre semble pouvoir être atteint au terme d'un transit de quelques kilomètres au plus, soit une fraction assez minime de l'ensemble du cours réalimenté²⁴.

3.2.1.2 Oxygénation

Tous les suivis réalisés en aval des réservoirs contrôlés montrent que le passage dans les organes de restitution (vanne, puis chenal de tranquillisation et seuil déversant) permet, si nécessaire, une réoxygénation conséquente de l'eau délivrée en aval.

La chronique des mesures²⁵ du taux d'oxygénation en aval immédiat des réservoirs étudiés montre ainsi que ce taux est proche de 90% dans 75 % des cas, et que 90% des mesures témoignent d'un taux d'oxygénation supérieur à 75%.

On montre également que le taux d'oxygénation évolue favorablement au cours du transit vers l'aval, la réoxygénation complète de l'eau pouvant être achevée après un transit de quelques centaines de mètres.

L'effet d'oxygénation observé n'apparaît pas relié au type de vanne mis en place (vanne « plate », « à jets tubulaires » ou « à jet creux ») ; il semble en revanche s'accroître avec l'augmentation du débit restitué.

Le taux minimal observé en aval immédiat des plans d'eau contrôlés (5 à 7 mg/l selon les plans d'eau) permet d'éviter tout effet toxique vis à vis des peuplements aquatiques, et permet en outre d'amorcer des phénomènes chimiques d'oxydation des composés réduits.

²⁴ Entre 30 et 150 kilomètres par réservoir.

²⁵ Chronique répartie sur l'ensemble de l'année, et plus dense en période estivale lorsque les eaux de fond sont en phase d'anoxie sévère.

3.2.1.3 Teneurs en nutriments (nitrates et phosphates)

Les contrôles effectués de part et d'autre de divers réservoirs montrent que ces derniers sont susceptibles d'exercer un certain abattement des concentrations en nitrates et en phosphates. Cet effet résulte d'une part de la consommation de ces nutriments par le phytoplancton lacustre, mais également de phénomènes purement physiques ou chimiques (dégagement d'azote gazeux intéressant les eaux de surface, mécanismes de réduction des nitrates pouvant concerner les eaux profondes en période estivale, précipitation et insolubilisation du phosphore).

L'importance de ce phénomène s'avère variable en fonction des conditions saisonnières (elle est plus sensible au printemps et en été), mais également des concentrations mesurées en amont du plan d'eau²⁶.

Les séries des concentrations en nitrates et en phosphore mesurées tout au long de l'année en aval immédiat de réservoirs mésotrophes à eutrophes sont compatibles avec un classement en eaux de « bonne qualité » selon les grilles du SEQ-Eau.

3.2.1.4 Teneurs en azote réduit et en composés organiques

Les eaux restituées en aval de réservoirs peuvent présenter un certain enrichissement en composés organiques et en azote réduit, cet enrichissement dépendant de l'importance de la biomasse produite à l'intérieur du volume d'eau stockée. La mesure régulière des concentrations en ammonium, nitrites, azote Kjeldahl et carbone organique aboutit aux conclusions suivantes :

- . en aval immédiat de réservoirs mésotrophes à méso-eutrophes, les séries de mesures obtenues sont compatibles avec un classement en eaux de « bonne qualité » selon les grilles du SEQ-Eau. Pour des réservoirs plus nettement eutrophes, la qualité devient « passable », du fait de quelques pics de concentration observables en période de restitution estivale,

- . les concentrations évoluent favorablement vers l'aval à mesure de la réoxygénation de l'eau et de l'auto-épuration. Les mesures pratiquées à 5 kilomètres en aval des retenues correspondent dans tous les cas à des eaux de bonne qualité, et il est concevable que cet état soit atteint encore plus en amont.

3.2.2 Effets globaux

Au delà des quelques kilomètres situés en aval immédiat des ouvrages de retenue, les incidences « locales » évoquées précédemment sont définitivement estompées, et le restant du cours d'eau bénéficie, en période de réalimentation, d'un apport d'eaux de bonne qualité.

²⁶ L'abattement est moindre lorsque les concentrations amont sont elle-mêmes faibles.

Le fonctionnement des réservoirs de réalimentation permet d'augmenter sensiblement les valeurs de débit pouvant être garanties en période d'étiage, à la station de contrôle (placée au point critique du cours d'eau réalimenté), en s'approchant autant que possible de la valeur (« débit de salubrité ») assurant le bon fonctionnement physico-chimique et biologique du cours d'eau. L'impact correspondant est évidemment positif.

4 Impacts sur les peuplements aquatiques

La création de réservoirs de réalimentation s'accompagne de certaines modifications du peuplement piscicole des cours d'eau qui y sont reliés. Les transformations les plus spectaculaires sont celles survenant dans l'emprise du plan d'eau ; des effets plus ou moins sensibles peuvent cependant être observés de part et d'autre de la retenue créée.

4.1 Dans l'emprise du plan d'eau

Un plan d'eau constitue de manière évidente un milieu propice au développement des peuplements aquatiques. Il est cependant clair que les peuplements aquatiques lacustres diffèrent sensiblement de ceux associés aux eaux courantes. Ainsi, dans les conditions du Sud-Ouest de la France (zones de montagne exclues), la création d'un barrage-réservoir tend à remplacer un peuplement originel relevant de la partie inférieure de la zone biogéographique « à truite », ou encore de la zone « à ombre », par un peuplement apparenté à celui des zones « à barbeau », voire « à brème »²⁷. Cette transformation s'y accompagne d'un renouvellement complet des communautés piscicoles initiales.

Les réservoirs de soutien d'étiage sont par ailleurs caractérisés par un marnage annuel régulier et important. Par le biais de la réduction estivale des surfaces en eau, et de la réduction des ceintures de végétation aquatique, ce marnage a pour effet de limiter la productivité biologique des plans d'eau.

C'est ainsi que la biomasse piscicole évaluée sur les principaux réservoirs hydro-agricoles du piémont pyrénéen s'est avérée inférieure à celle de lacs naturels placés dans des conditions physiques analogues, et plutôt comparable à celle de lacs de montagne²⁸.

²⁷ La composition précise du peuplement piscicole du plan d'eau dépend avant tout du type de gestion piscicole mis en place.

²⁸ Pour lesquels l'importance du peuplement piscicole est limitée par la faiblesse du niveau trophique (lacs oligotrophes à ultra-oligotrophes).

4.2 En amont du plan d'eau

Dans la mesure où le plan d'eau n'est pas isolé du cours d'eau amont par un ouvrage particulier (seuil anti-migratoire), des espèces de poissons provenant de la retenue sont susceptibles d'être rencontrées sur le cours de la rivière proche de la queue de retenue.

Les suivis effectués en amont des principales retenues gasconnes montrent qu'en ce cas cette colonisation vers l'amont est surtout le fait de jeunes individus, sur un tronçon de quelques centaines de mètres de longueur.

4.3 En aval de la digue

Sur le cours de la rivière situé en aval de la retenue, les peuplements piscicoles originels sont susceptibles d'évoluer sous l'action des principaux facteurs suivants :

- **modifications hydrologique et hydrauliques.** En période de remplissage, le maintien d'un débit réservé équivalent au débit « ordinaire » permet de conserver en aval du barrage des caractéristiques d'habitat analogues aux conditions initiales, et ne constitue donc pas un facteur d'évolution majeur²⁹. En revanche, en période de restitution, l'augmentation des débits et des vitesses d'écoulement peut contribuer à créer des conditions défavorables vis à vis du maintien des peuplements aquatiques (originels ou introduits).
- **modifications thermiques.** Les écarts thermiques observés en fin de printemps et en début d'été peuvent constituer une perturbation importante dans la reproduction et la croissance des juvéniles pour de nombreuses espèces de cyprinidés d'eau courante.
- **diffusion d'espèces.** Des poissons échappés de la retenue sont susceptibles de se maintenir en aval de celle-ci, et de concurrencer les espèces autochtones. Les conséquences de ces « évasions » sont fonction du degré de divergence entre le peuplement introduit dans le plan d'eau, et le peuplement initial du cours d'eau.

Les suivis des peuplements piscicoles effectués en aval des retenues de Puydarrieux et de Lunax permettent de considérer que les modifications évoquées, sensibles en aval immédiat des réservoirs, sont déjà résorbées à l'issue d'un transit de quelques kilomètres (8 km en aval de Puydarrieux, 4 km en aval de Lunax).

²⁹ Sur certains bassins, l'interception des crues d'automne par le remplissage des réservoirs a été considérée comme un facteur susceptible de retarder les migrations des truites adultes vers leurs lieux de ponte ; un tel facteur ne joue pas en Gascogne (simplement en raison de l'absence des truites en aval des ouvrages).

4.4 Effet d'obstacle

Le marnage affectant les réservoirs de réalimentation ne permet pas de les équiper de dispositifs permettant leur franchissement par les poissons. Les digues s'opposent donc à toute remontée migratoire. Dans le contexte du Sud-Ouest, l'incidence de cet effet d'obstacle sur les dynamiques des peuplement piscicoles peut cependant être considérée comme mineure, car :

- les cours d'eau secondaires de coteau et de plaine n'abritent que peu d'espèces migratrices (il s'agit essentiellement du chevesne, tandis que la truite y est naturellement rare ou absente),
- l'implantation des réservoirs très en amont des réseaux hydrographiques laisse encore accessible la majeure partie du linéaire des cours d'eau.

5 Protection et valorisation du milieu aquatique : retours d'expérience

5.1 Protection de la qualité des eaux

5.1.1 Recommandations générales

La préservation de la qualité des eaux stockées passe par la maîtrise du niveau trophique du plan d'eau, afin de limiter l'ampleur de la dégradation estivale de la qualité des eaux profondes. A cet effet, il importe :

- de raisonner l'implantation des réservoirs en évitant autant que possible la proximité de sources polluantes ponctuelles (élevages, agglomérations) susceptibles d'un apport excessif de phosphore.
- de veiller au maintien, en bordure du plan d'eau, d'un filtre végétal capable de retenir les nutriments ou les particules minérales entraînées par le lessivage des sols du bassin versant. Une telle disposition est facilement assurée par l'interdiction de toute culture sur la bande de terrain comprise entre la cote maximale du plan d'eau normal et celle des plus hautes eaux exceptionnelles, (cette zone périphérique, pouvant représenter une largeur de 5 à 10 mètres, fait partie des surfaces acquises en pleine propriété par le Maître d'Ouvrage).

Par ailleurs, en vue de limiter l'ampleur des phénomènes intéressant la première mise en eau, il importe de procéder, lors des travaux de terrassements, à un débroussaillage soigné de l'emprise du plan d'eau ; les produits de ce débroussaillage, ainsi que les délaissés de l'exploitation forestière sont brûlés sur place (et non enfouis), afin de limiter le stock de matière organique à décomposer. Pour ce même objectif, la mise en eau des parcelles cultivées ne devrait être

effectuée qu'après exportation (par récolte, fauche ou éventuellement pâturage), de la biomasse végétale présente en surface. Enfin, en vue d'accélérer la minéralisation de la matière organique des sols, et l'immobilisation du phosphore qui pourrait y être contenu, il est recommandé de procéder, au cours des deux à trois premières années suivant la mise en eau, à des vidanges aussi complètes que possible de la retenue.

Enfin, à l'échelle du bassin versant, il apparaît souhaitable que le Maître d'Ouvrage ou le gestionnaire de retenues soit reconnu en tant que partenaire à consulter ou associer à l'occasion de tout projet pouvant conduire à modifier (en hausse ou en baisse) les émissions de nutriments vers les milieux aquatiques, ou en tant que force de proposition en vue d'un aménagement concerté du bassin versant.

5.1.2 Opportunités des dispositifs à prises étagées

Les prises étagées font actuellement l'objet de préconisations de plus en plus systématiques. Elles sont censées apporter au gestionnaire de l'ouvrage des solutions diversifiées d'exploitation des différentes couches d'eau du réservoir. Plusieurs de nos réservoirs (grands ou moyens), sont équipés de tels dispositifs ; nous en percevons cependant les limites.

En premier lieu, la pleine fonctionnalité d'un dispositif à prises étagées suppose la mise en place sur chacun des pertuis, d'équipements automatiques de régulation des débits appelés, et de mesure de la qualité des eaux. Ceci engendre des coûts non négligeables, à la fois en termes d'équipement et de maintenance.

Plus fondamentalement, un ouvrage destiné à la réalimentation d'un cours d'eau se gère, en temps réel, via la détermination d'un débit de consigne. Une gestion additionnelle des ouvertures d'une série de prises étagées introduirait alors un jeu de contraintes non négligeables, et difficilement solubles en temps réel :

- détermination d'un objectif de qualité, par combinaison et hiérarchisation des valeurs atteintes par différents paramètres³⁰,
- régulation en continu des débits délivrés par les différentes prises (fonctionnant sous ouverture et charge variables) de façon que leur somme soit constamment égale au débit de consigne, et que la qualité résultant du mélange de ces débits soit conforme à l'objectif.

En supposant que ce jeu de contraintes puisse être formulé d'une façon satisfaisante pour les différentes parties prenantes, et soit par ailleurs soluble, l'état

³⁰ Même en excluant le paramètre d'oxygénation, qui ne constitue pas véritablement un problème, de nombreux paramètres restent en jeu (température, teneurs en azote, en matières organiques ou en composés réduits, densité du phytoplancton...), et peuvent conduire à des choix contradictoires sur la tranche d'eau à restituer. Choisira-t-on enfin une gestion privilégiant la préservation de la qualité des eaux restituées, ou celle des eaux stockées ?

actuel des performances des équipements, du savoir-faire des opérateurs et de la connaissance des milieux naturels nous laisse penser que l'efficacité d'une telle gestion sera pour le moins aléatoire, voire utopique.

On soulignera enfin que la vogue actuelle des dispositifs à prises étagées nous paraît résulter d'un parti-pris formel consistant à décréter la non utilisation des eaux de fond de réservoir qui seraient de moindre qualité que les eaux superficielles.

Or, cette constatation n'est vérifiée qu'épisodiquement dans le cours d'une campagne ; elle s'avère par ailleurs sans effet majeur sur les potentialités hydrobiologiques de la rivière réalimentée (au delà d'un tronçon de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres) ; enfin, une gestion consistant à éviter l'évacuation des eaux de fond risque de conduire à terme de quelques années à une accumulation de nutriments et de substances indésirables dans le plan d'eau, susceptible d'élever sérieusement son niveau trophique, et donc de détériorer la qualité de l'ensemble de la masse d'eau stockée, ce qui ne sera évidemment pas sans répercussions sur la qualité des eaux évacuées (quel que soit alors le niveau de prise).

5.1.3 Dispositifs de by-pass

La mise en place d'un dispositif de by-pass, constitué d'une conduite traversant ou contournant la retenue tend également à faire l'objet de prescriptions de plus fréquentes aux constructeurs, et ce quelle que soit la capacité des ouvrages ; dans certains cas, de véritables chenaux de contournement, dimensionnés sur des débits de crue, ont même été exigés. Ces dispositifs sont censés garantir à la fois le respect des débits réservés, et la préservation de la qualité des eaux.

Si de tels by-pass nous paraissent pouvoir présenter un certain intérêt vis à vis du parc de très petites retenues (principalement dans la mesure où ils permettent d'assurer le respect automatique des obligations relatives au débit réservé³¹), notre expérience nous amène à contester vigoureusement leur opportunité dans le cas de réservoirs de moyenne ou grande capacité destinés à la réalimentation des cours d'eau. En effet :

- pour les gestionnaires de tels ouvrages, relativement peu nombreux et donc facilement contrôlables du point de vue du respect des obligations légales, il ne peut être question de contourner la réglementation relative au maintien du débit réservé,

³¹ On citera à titre d'exemple le bassin versant de la Séoune (affluent de la Garonne), où près de 30 % de la superficie est intercepté par de petites retenues individuelles à usage d'irrigation. Généralement dépourvues de tout dispositif de restitution d'un débit réservé, ces retenues interceptent en période d'étiage la totalité du ruissellement susceptible de leur parvenir.

- en période de remplissage, la qualité des eaux stockées est analogue à celle des eaux parvenant en amont du réservoir ; il n'y a alors pas d'intérêt objectif à un dispositif de contournement,
- en période de restitution, les débits délivrés par l'ouvrage sont sans commune mesure avec ceux parvenant en amont du réservoir ; aucune amélioration de la qualité des eaux ne peut sérieusement être attendue par un apport direct d'eaux n'ayant pas traversé le stockage.

5.2 Gestion piscicole et halieutique

5.2.1 A l'intérieur du plan d'eau

L'implantation d'un peuplement piscicole fait partie des mesures permettant d'assurer un bon équilibre biologique de la retenue. A définir en étroite concertation avec les instances compétentes (Fédération Départementale des AAPPMA, et Conseil Supérieur de la Pêche), il ne devrait toutefois être réalisé qu'à partir de la troisième année de mise en service (compte tenu de la recommandation de procéder au cours des premières années à des abaissements importants du plan d'eau.

5.2.2 Sur le cours d'eau en aval

Les modifications des conditions hydrauliques et thermiques en aval immédiat de la retenue ont été identifiées en tant que facteurs potentiellement défavorables vis à vis de certaines des espèces de poissons fréquentant le cours d'eau. La gestion courante des ouvrages peut cependant intégrer des actions visant à réduire ces impacts ; parmi celles pratiquées, définies en relation avec les instances gestionnaires des peuplements piscicoles, nous citerons notamment :

- en phase d'été (fin de printemps), l'évacuation « par le fond » des volumes excédentaires, qui permet d'éviter l'un des différentiels thermiques évoqués précédemment,
- la modulation du débit réservé en fonction des cycles de reproduction des poissons, afin de faciliter l'accès du tronçon de cours d'eau proche du réservoir, aux espèces susceptibles de s'y reproduire,
- des augmentations ponctuelles des débits restitués au cours de la période de remplissage. Ces petites crues artificielles permettent d'assurer un certain « nettoyage » du cours d'eau aval, en reprenant les matières naturellement déposées sur le substrat de la rivière.

Enfin, le secteur de cours d'eau proche du réservoir peut faire l'objet d'aménagements destinés à réguler les vitesses de l'écoulement et à **conserver**

une certaine diversité des composantes de l'habitat ; de tels aménagements sont en cours de test sur deux cours d'eau (Hautes-Pyrénées et Tarn).

6 En conclusion à ce stade de notre expérience

A l'issue de différentes études de suivi du fonctionnement de réservoirs exploités suivant un cycle annuel de remplissage et de vidange, un certain nombre de conclusions peuvent être avancées ; nous espérons qu'elles permettront de nuancer des prises de position souvent trop hâtives, et de combattre quelques idées reçues.

Le fonctionnement des réservoirs de réalimentation n'engendre pas de dysfonctionnement hydraulique sur les cours d'eau réalimentés. Leur incidence hydrologique ne résulte pas particulièrement de la valeur absolue des débits délivrés, mais tient plutôt à l'inversion du régime des eaux ; elle peut indirectement être ressentie par les peuplements aquatiques, mais sur un tronçon d'extension relativement réduite.

Vis à vis de la qualité de l'eau, le fonctionnement de ces réservoirs introduit, en aval des ouvrages, des modifications concernant le cycle thermique, et certains des paramètres chimiques (azote, phosphore, matières organiques) ; ces modifications ne peuvent se résumer à un procès de dégradation ; la qualité des eaux restituées est généralement bonne dès l'aval immédiat des retenues ; dans le cas contraire (période estivale dans le cas de retenues nettement eutrophes), la qualité des eaux est passable en pied de barrage, et devient bonne à l'issue d'un transit de quelques kilomètres.

Ce type de réservoir est apte à héberger un peuplement piscicole typique des eaux calmes, avec toutefois une productivité réduite par les effets du marnage. De façon directe (« évasions » de poissons) ou indirecte (effets hydrologiques ou thermiques), le fonctionnement des ouvrages peut contribuer à modifier le peuplement piscicole en aval de la retenue. Plus ou moins sensibles en fonction des caractéristiques initiales du cours d'eau, ces modifications sont imperceptibles au delà d'un tronçon de quelques kilomètres.

Le constat objectif des impacts environnementaux liés à la création et au fonctionnement de réservoirs de soutien des étiages ne conduit pas à nier l'existence de tels effets, mais à en relativiser l'importance, en termes d'acuité, d'extension géographique, et, finalement, de bilan global vis à vis de l'ensemble de l'écosystème. Cette analyse débouche en outre sur la mise au point de pratiques de gestion permettant d'atténuer les impacts, et fournit des arguments permettant d'enrichir le débat concernant la conception et l'équipement des ouvrages.

A l'échelle internationale le Comité International des Grands Barrages (CIGB) s'est fortement préoccupé de rassembler toutes les données correspondant à des constats réels et scientifiques sur un vaste parc d'ouvrages existants et ainsi couper court aux fausses bonnes idées en matière de gestion de tels ouvrages. Cette préoccupation vient d'être relayée à l'échelon national du CFGB au sein duquel s'est constituée une cellule environnementale pour rassembler toutes les expériences et donner suite aux pistes de recherche technologiques réalistes. Il n'est pas exclu qu'à terme la confrontation de ces diverses réflexions permette de diffuser à l'usage des gestionnaires d'ouvrages des conseils ou consignes encore mieux fondées.

Impact des discontinuités sur la dynamique des peuplements de macrophytes en grands cours d'eau

Application à l'hydrosystème Adour-Garonne

Discontinuities impacts on dynamics of macrophytes populations in large rivers.

Application to Adour-Garonne hydrosystem

Emilie Breugnot, Alain Dutartre, Christophe Laplace-Treytore

Cemagref, Unité de Recherche Qualité des Eaux

50 avenue de Verdun, 33612 Cestas

Tel. 05 57 89 08 00

Fax 05 57 89 08 01

E.mail : emilie.breugnot@bordeaux.cemagref.fr

alain.dutartre@bordeaux.cemagref.fr

christophe.laplace@bordeaux.cemagref.fr

Jacques Haury

Laboratoire d'Ecologie et Sciences phytosanitaires

Département Agronomie, Espace Rural et Environnement (AGREERE)

UMR INRA-ENSAR Ecobiologie et Qualité des Hydrosystèmes continentaux

65, rue de Saint Briec - F35042 RENNES CEDEX

Tél. 33 02 23 48 55 39

Fax 33 02 23 48 51 70 / 54 40

E mail : haury@roazhon.inra.fr

Résumé

Les macrophytes sont un compartiment biologique fonctionnel des cours d'eau et permettent d'estimer la qualité des rivières à travers l'Indice Biologique Macrophytique en Rivière (I.B.M.R.).

Dans les zones aval des cours d'eau, la distribution de ces macrophytes semble principalement déterminée par les facteurs physiques du milieu (écoulement, substrat, profondeur, turbidité...).

Cependant, des discontinuités naturelles (confluences) et surtout d'origine anthropique (barrages) perturbent fortement ces paramètres physiques et donc également la dynamique de la végétation aquatique.

Dans le cadre du programme ECOBAG mené depuis 2000, huit stations placées en amont et en aval des discontinuités étudiées, ont été choisies sur deux cours d'eau du Sud-ouest de la France (Dordogne et Garonne). Sur ces sites, les macrophytes sont échantillonnés régulièrement durant la période estivale.

Les premiers résultats illustrent les corrélations existant entre le développement des macrophytes et les paramètres physiques, et permettent de présenter quelques tendances.

Abstract

Macrophytes are a functional group of rivers and are used to assess running water quality through the Macrophyte Biological Index for Rivers (I.B.M.R.). In rivers downstream areas, macrophytes distribution seem to be more likely determined by physical factors (out-flows, substrates, depth, turbidity...).

Natural discontinuities (confluence) but especially artificial ones (dams) can greatly disturb these physical parameters and then the aquatic vegetation.

As part of the ECOBAG program, started in 2000 in the Cemagref, eight study sites, located upstream and downstream to discontinuities, were chosen in two rivers of South West of France (Dordogne and Garonne). Macrophytes are regularly sampled on these sites during summer.

First results illustrate interrelations between macrophytes development and physical parameters and allow us to present some trends.

Mots-clés : Macrophytes, Discontinuités

Keywords : Macrophytes, Discontinuities

Introduction

Les macrophytes, végétaux aquatiques identifiables à l'œil nu, peuvent appartenir à différents groupes taxonomiques : algues, bryophytes, ptéridophytes, spermaphytes. Ils jouent des rôles importants dans les cours d'eau en tant que producteurs primaires et en tant qu'habitats pour de nombreux autres organismes de la flore et de la faune. Ils sont également utilisés comme des indicateurs de la qualité des milieux aquatiques.

Le développement de ces peuplements est soumis à des paramètres abiotiques et en particulier à des contraintes hydrodynamiques particulièrement importantes dans les grands cours d'eau. Si ces paramètres évoluent normalement suivant un gradient continu de l'amont vers l'aval (River Continuum Concept, Vannote et al., 1980), il existe des ruptures dans ce continuum, naturelles (confluences) ou d'origine anthropique (barrages). Il est établi que des discontinuités telles que les barrages, jouent un rôle majeur dans la distribution des phytocénoses des rivières dont ils modifient l'hydrologie (Haury et al., 1996a, Bernez et al., 2002). En effet, de part leur effet régulateur, les barrages réduisent les événements exceptionnels type crues, qui, dans les cours d'eau non aménagés, limitent les développements de macrophytes en les arrachant.

Une étude débutée en 2000 dans le cadre du programme ECOBAG se propose donc d'étudier les impacts de ces discontinuités sur les peuplements de macrophytes. Après avoir rappeler le contexte et les objectifs de cette étude, on détaillera la méthodologie employée. Enfin, on présentera les premiers résultats obtenus sur des stations de la Garonne et de la Dordogne qui montrent que les développements de ces végétaux sont principalement déterminés par les paramètres physiques du milieu.

1. Contexte et objectifs

1.1 Intérêt et nuisances du compartiment macrophytes

Bien que leurs rôles fonctionnels soient maintenant assez bien connus, les macrophytes, pour les gestionnaires et les usagers, n'apparaissent le plus souvent qu'en terme d'occupation de l'espace et sont considérés comme une nuisance lorsque leur développement devient important. C'est le cas par exemple à Entraygues-sur-Truyères où depuis de nombreuses années des herbiers de renoncules aquatiques occupent des surfaces notables du lit de la Truyère à l'aval du barrage de Cambeyrac, et où des méthodes de régulation de ces développements viennent d'être testées pour remédier à cette situation.

1.2 Influence des facteurs physiques et chimiques du milieu

Grâce à leurs capacités bio-intégratrices des conditions physiques et trophiques du milieu (Haury et al., 1996b ; Grasmuck et al., 1995), les macrophytes ont été retenus pour l'évaluation de la qualité écologique des cours d'eau dans la Directive Cadre sur l'Eau. Un Indice Biologique Macrophytique en Rivière (IBMR – Haury et al., 2002) est également en cours de validation AFNOR.

Les peuplements de macrophytes agissent également sur le milieu : ils ralentissent les vitesses de courant, piègent les sédiments, libèrent des nutriments et créent de ce fait de nouveaux habitats (Dawson, 1988).

Fortement déterminée par le niveau trophique dans les secteurs amont, la croissance des macrophytes semble plus sensible à l'environnement physique vers l'aval, dès lors que les profondeurs et les vitesses de courant augmentent, alors que les nutriments ne sont plus limitants. L'étude des macrophytes dans des cours d'eau de grande taille nécessite donc la prise en compte de contraintes supplémentaires. Ceci explique que relativement peu de travaux concernant les macrophytes aient été menés sur ces milieux, excepté certaines recherches parmi lesquelles on peut citer celles de Janauer (1999), Janauer et Wichera (1999) sur le Danube.

Pour comprendre les relations entre paramètres du milieu et macrophytes des grands cours d'eau, des recherches ont été entreprises depuis 2000. Elles s'inscrivent dans le cadre du programme « Hydro-écologie » du GIS ECOBAG (Groupement d'Intérêt Scientifique Environnement Ecologie et Economie du Bassin Adour-Garonne), dont l'un des axes de recherche, « hydro-écologie de la Garonne » s'attache entre autres à l'étude du compartiment végétal.

1.3 Objectifs

Le projet vise en un premier temps à mieux connaître les tendances annuelles générales de l'hydrodynamique et de la dynamique des populations de macrophytes sur les sites étudiés.

Il s'agit ensuite de déterminer et de hiérarchiser les facteurs (essentiellement physiques) influençant la répartition des peuplements de macrophytes. A partir de ces éléments on pourra analyser l'impact de discontinuités en particulier d'origine anthropique sur les caractéristiques quantitatives et qualitatives de la végétation aquatique.

Ce travail devrait permettre de poser les bases d'une modélisation des relations entre facteurs environnementaux et communautés végétales dans ce type de cours d'eau.

2. Méthodologie

La méthodologie utilisée s'appuie sur des travaux entrepris au sein de l'Unité de Recherche Qualité des Eaux depuis plusieurs années. (Il s'agit en fait plutôt d'adaptations d'une méthodologie « idéale » en fonction des réalités du terrain.)

2.1 Choix de la méthode d'étude des macrophytes

De nombreuses méthodologies ont déjà été testées et comparées pour l'étude des macrophytes mais sont souvent adaptées à des cours d'eau de petite taille (Wright et al., 1981). La plupart sont réalisées par observation directe des végétaux et par prospection à pied (Hache, 2001). Or, l'étude des macrophytes sur grands cours d'eau impose des contraintes supplémentaires (profondeur, largeur, vitesses de courant).

- La prospection à pied n'est possible que lorsque le cours d'eau est peu profond. Bien que cette méthode soit certainement la plus efficace, des profondeurs importantes (jusqu'à 4 m) imposent l'observation indirecte des peuplements à l'aide d'outils (râteau à manche télescopique ou grappin (Kohler, 1978)).

- La plongée : dangereuse dans les zones de fort courant, elle nécessite des moyens humains et matériels trop lourds à mettre en œuvre.
- La photographie aérienne : peu performante si l'eau est trop turbide et si les zones marginales sont recouvertes par la végétation.
- Echantillonnage par quadrats (Raschke et Rusanowski, 1984) : non adapté aux cours d'eau profonds et/ou turbides.

• **Méthode retenue**

Les stations sont choisies de manière à encadrer les discontinuités dont on veut étudier les impacts. Chaque station, mesurant au moins 100 m de long doit être représentative du tronçon étudié.

Une méthode, inspirée de celle des points contact utilisée depuis longtemps dans les études prairiales (Daget et Godron, 1982), est appliquée de la manière qui suit. Elle consiste à réaliser des prélèvements réguliers le long de profils transversaux du lit. Ces profils, matérialisés à l'aide de cordages lors des premières campagnes, sont désormais repérés à l'aide d'un GPS qui permet une plus grande précision dans la localisation des profils et des prélèvements. Un échantillonnage est alors réalisé régulièrement le long de ces profils (méthode des points contact) par des prélèvements à l'aide d'un râteau à manche télescopique permettant d'atteindre les végétaux les plus profonds. Un indice d'abondance de 1 à 5 est alors attribué à chaque taxon présent dans l'échantillon prélevé :

- 1 : espèce très peu présente sur le râteau
- 2 : espèce présente en petite quantité sur le râteau
- 3 : espèce très abondante sur le râteau
- 4 : espèce très abondante sur le râteau
- 5 : espèce présente sur l'ensemble du râteau en grande quantité

On peut alors calculer le **recouvrement des taxons sur les points contacts** en pondérant chaque note d'abondance (Daudin et al., 2000) :

$$\% \text{ Re } c = \frac{100 (a + 0,75 b + 0,5 c + 0,25 d + 0,05 e)}{\sum PC}$$

Avec :

- a : le nombre de points contacts pour un taxon donné ayant un indice de 5.
- b : le nombre de points contacts pour un taxon donné ayant un indice de 4.
- c : le nombre de points contacts pour un taxon donné ayant un indice de 3.
- d : le nombre de points contacts pour un taxon donné ayant un indice de 2.
- e : le nombre de points contacts pour un taxon donné ayant un indice de 1.
- ΣPC : le nombre total de points contacts réalisés sur la station.

Le premier point contact de chaque profil est placé de manière aléatoire. L'écartement entre deux points contacts est ensuite de 2,5 m. Cet intervalle est supposé suffisamment important pour que deux relevés successifs soient indépendants les uns des autres (Figure 1). Cette méthode de prélèvement correspond à un échantillonnage systématique (Codhant, 1992).

La méthode des points contacts reste relativement contestable, en particulier du fait de la faible représentativité des taxons peu ou faiblement abondants (Bernez, 1999). Elle est pourtant la seule qui permette une évaluation de l'occupation de la station par les macrophytes dans des conditions d'écoulements et de transparence des eaux très variables. Cette méthode est complétée par l'observation à pied des marges moins profondes du cours d'eau (méthode IBMR).

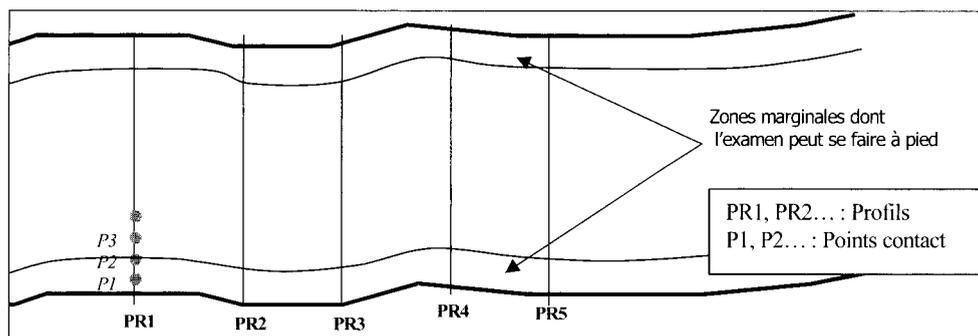


Figure 1 : Schéma de station étudiée grâce à la technique des points contacts (Bruneau, 2002)

- **Période d'échantillonnage**

Les campagnes d'échantillonnage ont lieu lorsque le développement des végétaux est repérable, et les débits des cours d'eau moyens à faibles, c'est-à-dire pendant la période estivale (de mai à septembre). Du fait de la relative lourdeur de l'échantillonnage, deux à trois campagnes sont réalisables par station durant cette période. Une campagne hivernale sera réalisée sur la station d'expérimentation pour avoir un cycle complet et évaluer le maintien de certains taxons dans les conditions hivernales.

2.2 Choix des stations (Figure 2).

Différents types de stations ont été choisis sur la Dordogne et la Garonne. Ces stations sont représentatives de la morphologie et des faciès d'écoulement de la zone étudiée. Leur localisation dépend des discontinuités dont on veut étudier les impacts, ainsi que de l'existence de stations déjà étudiées, appartenant par

exemple au « réseau macrophytes » (Moreau et Dutartre, 2000), mis en place par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne pour compléter les observations sur diverses stations du bassin, dont les stations du Réseau National de Bassin.

- **Stations de suivi**

Ces stations en encadrant les discontinuités permettront de suivre sur plusieurs années les peuplements de macrophytes et de mettre en relation les caractéristiques de leur développement avec les paramètres physiques et physico-chimiques mesurés.

En plus des relevés biologiques, des mesures hydrodynamiques et chimiques seront également réalisées.

Six stations existent déjà et ont été échantillonnées les années précédentes (Gardonne et Mouleydier sur la Dordogne, Roques et Portet sur Garonne pour la partie amont de la Garonne, et Lamagistère et Castelsarrasin pour la partie aval de la Garonne). Deux stations supplémentaires ont été rajoutées en 2003 (figure 2) :

- station de Boé sur la Garonne à l'aval de Lamagistère (confluence Garonne/Gers en amont de l'agglomération d'Agen)
- station de Lalinde sur la Dordogne (en amont du barrage de Tuilières).

- **Station d'expérimentation**

Cette station a été choisie sur la Dordogne en aval de la station de suivi de Gardonne. Sur cette station expérimentale, des essais méthodologiques complémentaires seront réalisés ainsi que pour valider et améliorer le protocole d'échantillonnage des végétaux en comparant différentes méthodes.

- **Stations de contrôle**

Une station de contrôle sur la partie aval de l'Ariège permettra de vérifier un certain nombre d'hypothèses fonctionnelles au niveau d'une confluence (arrivée potentielle de propagules, changements trophiques, hydrodynamiques).

- **Relevés linéaires**

Enfin, des relevés linéaires longitudinaux effectués à l'aval des discontinuités permettront d'observer un éventuel effet d'atténuation de l'impact des barrages (Bernez et al., 2002).

2.3 Paramètres mesurés

- **paramètres physiques :**

Différents paramètres physiques peuvent influencer la distribution des macrophytes : courant, substrat, largeur, profondeur et turbidité (Haslam, 1978), et sont à mesurer à chaque campagne de prélèvements ou au moins une fois sur chaque station (Tableau 1). Les mesures de vitesses effectuées sur le terrain permettent de préciser les conditions locales d'écoulement dans le cours d'eau et viennent compléter des données hydrauliques et hydrologiques déjà existantes comme les chroniques de débits.

Paramètres	Fréquence	Appareils de mesure
Profondeur	une fois par point contact	Râteau gradué
Substrat	une fois par point contact	Râteau (observation indirecte)
Vitesses de courant	une fois par profil	ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)
Turbidité	une fois par station	Disque de Secchi

Tableau 1 : Mesures des paramètres physiques sur le terrain

L'ADCP est utilisé depuis début 2003 et remplace le courantomètre classique des années antérieures. Cette nouvelle méthode, moins contraignante sur le terrain, permet surtout d'obtenir des mesures de vitesses de courant plus nombreuses, mieux réparties sur la hauteur de la colonne et plus précises avec un important gain de temps d'acquisition des données sur le terrain

- **paramètres chimiques**

Pour estimer l'influence des facteurs chimiques, des prélèvements d'eau sont effectués à chaque série d'investigation à des fins d'analyses de laboratoire portant en particulier sur les formes de l'azote et du phosphore et la matière organique. Ces données seront complétées par les données du réseau RNB.

- **paramètres biologiques**

En complément des relevés d'espèces par points contact et des estimations de recouvrement, des mesures morphologiques sur les macrophytes et des mesures de biomasses (Gouesse Aidara, 1986) sont envisagées.

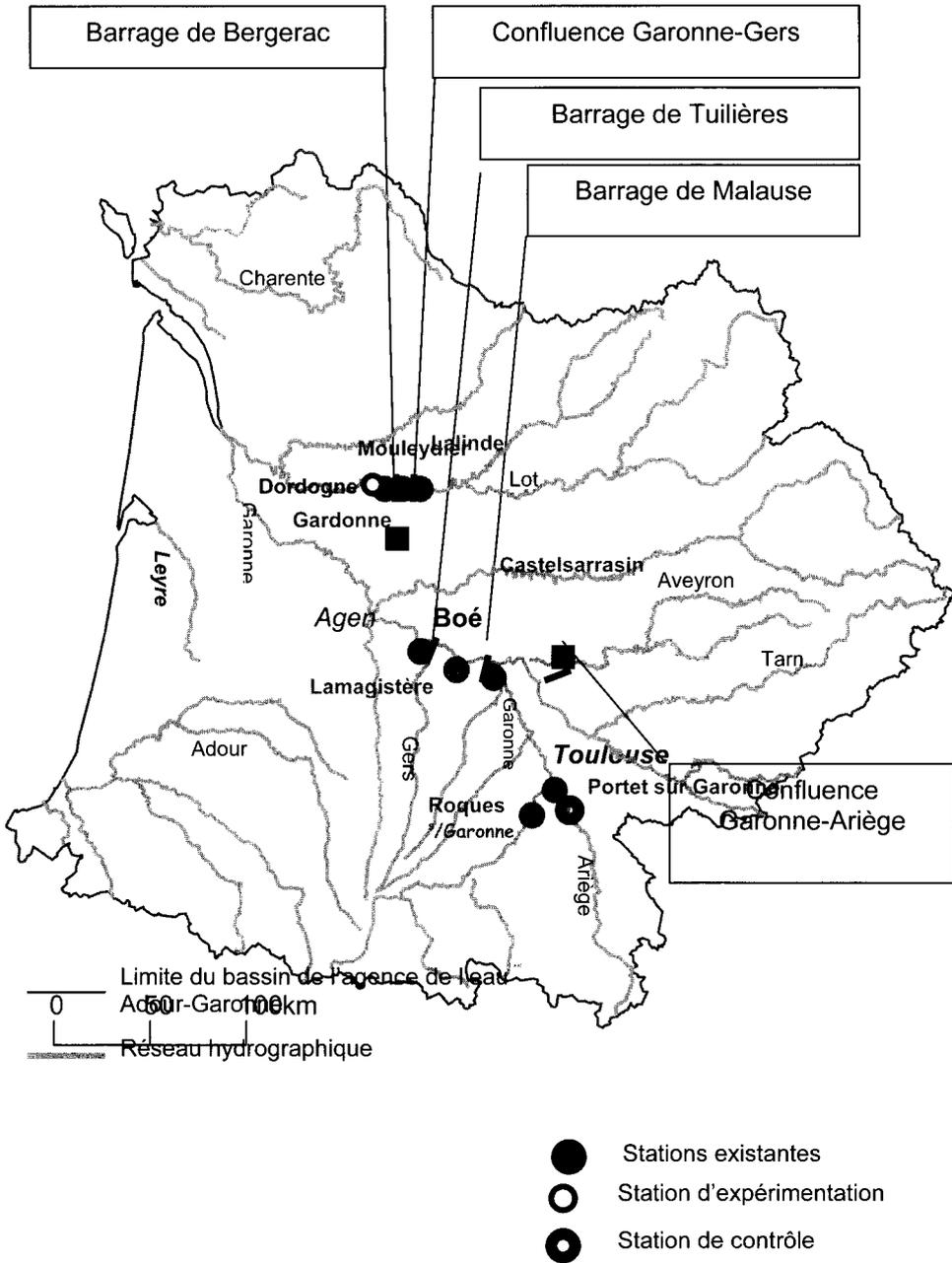


Figure 2 : Localisation des stations d'étude dans le bassin Adour Garonne

2.4 Analyses des données

Les données ainsi récoltées seront analysées statistiquement (ACP, ACC, AFM...) à différentes échelles (à celle de la station, du profil, du point contact). Ces résultats seront également intégrés dans des systèmes de réseaux neuronaux, afin de mettre en place les bases d'une modélisation des relations entre macrophytes et facteurs environnementaux, généralisable à différents types de cours d'eau.

3. Résultats partiels obtenus et discussion

L'historique des observations et prélèvements de 2000 à 2003 est présenté ci dessous (Tableau 2)

STATION	Cours d'eau	2000	2001	2002	2003
Roques sur Garonne	Garonne		Août	Non réalisée	Juin Août Septembre
Portet sur Garonne	Garonne		Août	Non réalisée	Juin Août Septembre
Castelsarrasin	Garonne		Août	Juin	Mai Juillet Septembre
Lamagistère	Garonne	Septembre	Août	Juin	Mai Juillet Septembre
Boé	Garonne				Mai Juillet Septembre
Gardonne	Dordogne	Août	Juin Août	Juin Juillet	Mai Juin Août
Mouleydier	Dordogne		Juin Août	Juin Juillet	Mai Juin Août
Lalinde	Dordogne				Mai Juin Août

Tableau 2

Les campagnes notées comme non réalisées en 2002 correspondent à des crues qui ont rendu impossibles les investigations.

3.1 Végétalisation des stations

La méthode des points contacts permet d'évaluer la fréquence des taxa sur les stations.

Les points contacts végétalisés (PCV) comportent au moins un taxon présent dans le prélèvement sans qu'il soit tenu compte de son abondance.

A titre d'exemple, la Figure 3 présente les résultats obtenus de 2000 à 2003 sur les stations de Lalinde, Mouleydier, et Gardonne sur la Dordogne.

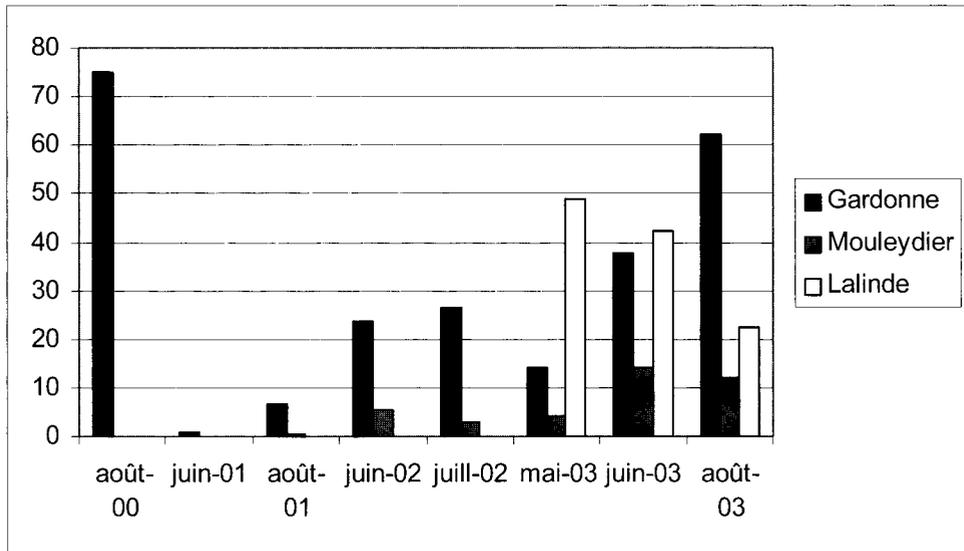


Figure 3 : Bilan du taux de points contact végétalisés (PCV) sur les stations de la Dordogne de 2000 à 2003 (en % du nombre de points contacts total)

Des variations notables de ce paramètre sont visibles sur plusieurs années. En particulier sur la station de Gardonne où on observe une forte chute du taux de points contact végétalisés entre 2000 et 2001, très probablement à relier aux chroniques des écoulements (Figure 4), qui montrent des crues importantes durant le printemps 2001. Sur cette même station, on observe depuis une augmentation du taux de PCV vraisemblablement due à l'absence de crues importantes sur la Dordogne durant l'hiver 2001-2002. On peut également noter la même tendance à l'augmentation du recouvrement de la végétation sur la station de Mouleydier.

La diminution du taux de PCV en 2003 à Lalinde correspond au fait que la végétation de cette station est très majoritairement constituée de Renoncules aquatiques qui atteignent leur maximum de croissance au début de l'été et dépérissent ensuite.

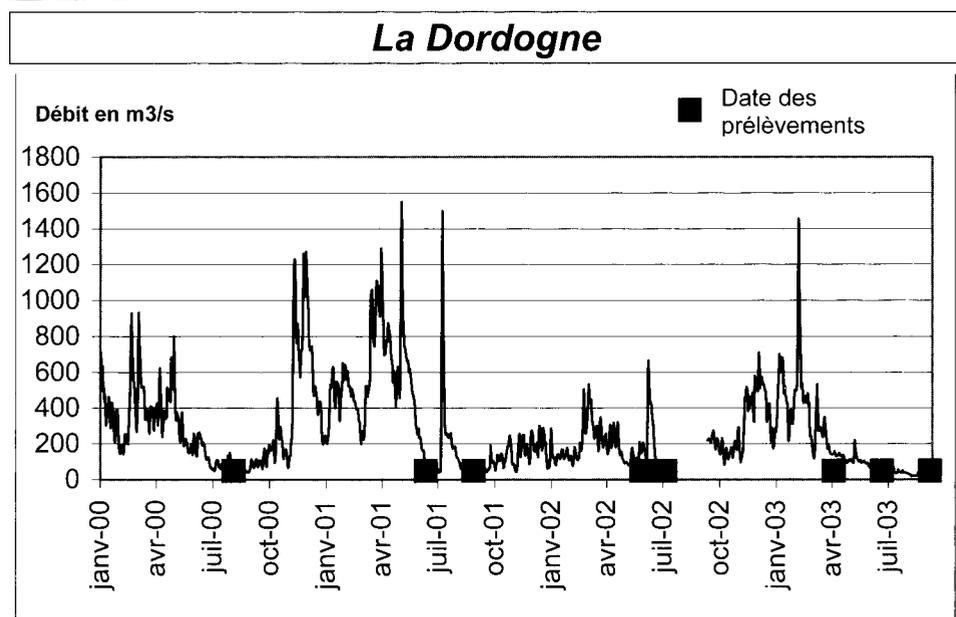
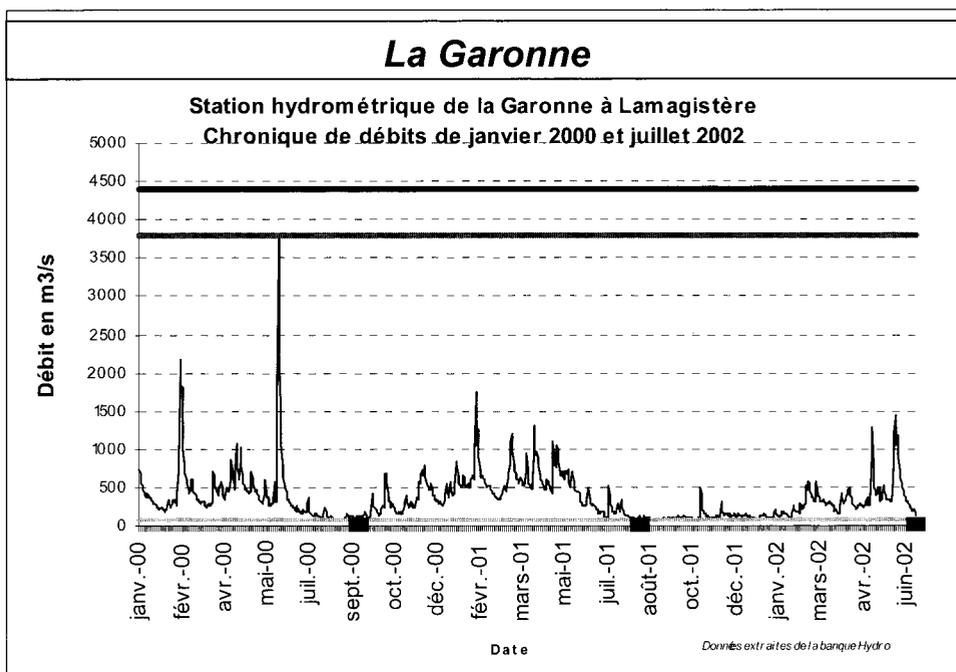


Figure 4 : Situation des campagnes de mesure par rapport aux débits de la Dordogne à Bergerac et de la Garonne à Lamagistère.

3.2 Richesse spécifique et diversité taxinomique

Comprenant l'ensemble des taxons recensés (bryophytes, phanérogames et algues) sur les points contacts et lors des prospections à pied, la richesse spécifique est un élément très important de description des peuplements.

La comparaison des richesses spécifiques entre 2001 et 2003 (Figure 5) permet quelques commentaires.

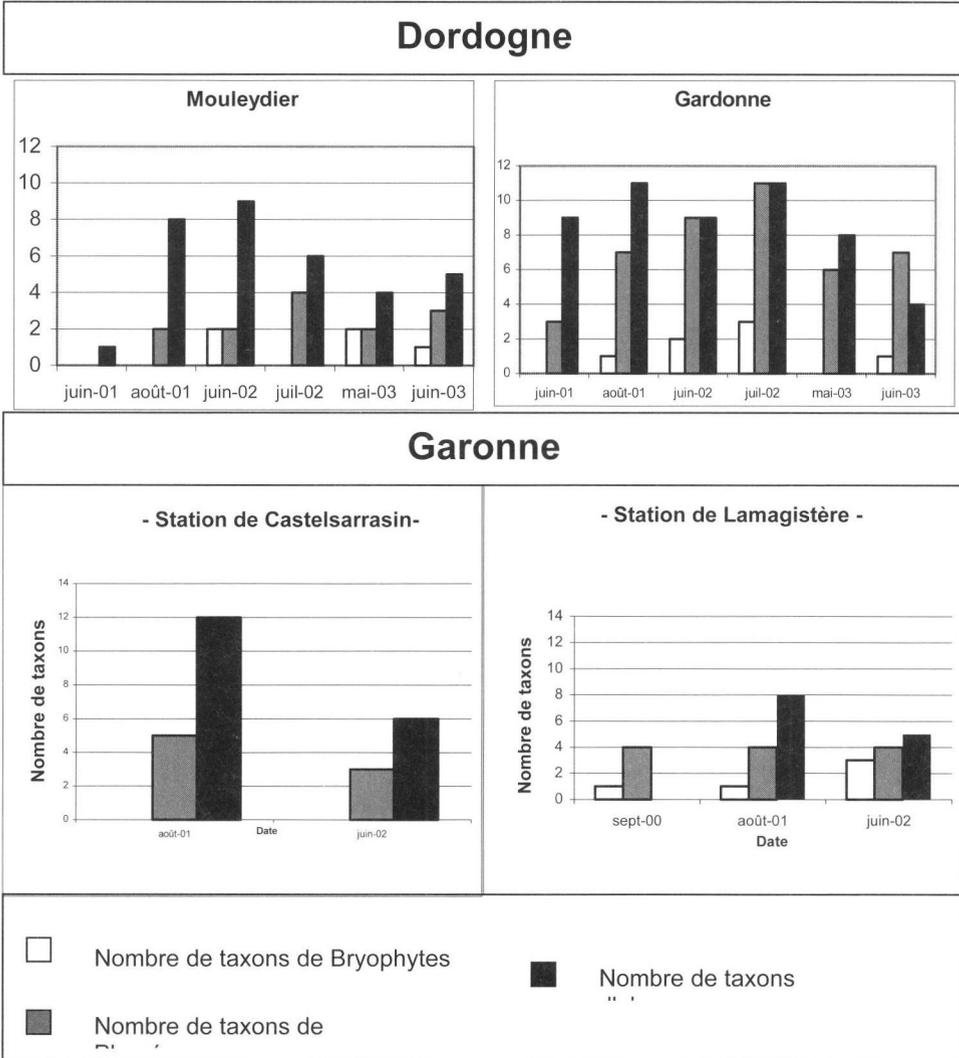


Figure 5 : Evolution interannuelle de la richesse spécifique

Notons que les stations aval, c'est à dire Gardonne et Lamagistère, comportent de manière générale les plus grandes richesses spécifiques.

. Sur la Dordogne

La richesse taxinomique varie d'une campagne à l'autre. Concernant les phanérogames, une augmentation du nombre de taxons depuis 2001 (bien qu'on observe une légère baisse entre 2002 et 2003 sûrement due à des phénomènes de crue début 2003) et entre les deux campagnes d'une même année est constatée.

Cela traduit une colonisation progressive du lit mineur et rappelle que la croissance végétative est concentrée sur la période estivale. On note également l'apparition d'une nouvelle espèce sur Gardonne, en juillet 2002 : le Jonc des chaisiers (*Schoenoplectus lacustris*), espèce généralement inféodée aux plans d'eau ou aux milieux très faiblement courants.

Sur les deux stations on rencontre deux taxons dominants. Tous deux sont des hydrophytes fixés sur le fond, il s'agit de la renoncule en pinceau (*Ranunculus penicillatus*) et du myriophylle en épis (*Myriophyllum spicatum* L.). Davantage indicatrices de conditions d'habitat (eaux peu turbides, à courant modéré, substrat grossier et fin), ces deux espèces seules ne permettent pas de conclure sur le niveau trophique du milieu.

En revanche, la présence de cyanophycées (*Oscillatoria* sp., *Cladophora* sp., *Vaucheria* sp.), sur les deux stations, et celle plutôt rare du cornifle (*Ceratophyllum demersum* L.) et du potamot pectiné (*Potamogeton pectinatus* L.) sur la station de Gardonne, du potamot crépu (*Potamogeton crispus* L.) et de la naïade (*Najas major* All.), correspondent à une certaine richesse en minéraux de l'eau (eaux mésotrophes).

La composition floristique allant des espèces se développant de préférence dans les milieux courants (ex : renoncules) à celles préférant les milieux lenticues (ex : jonc des chaisiers, cornifle, potamot crépu) illustre la grande diversité des habitats sur chaque station et des conditions hydrologiques au cours du temps.

. Sur la Garonne

On observe une diminution de la richesse spécifique sur la station amont entre 2001 et 2002 (plus précisément de la renoncule et de la vallisnérie), alors qu'elle se maintient à 4 taxons de spermaphytes sur celle située en aval, entre 2000 et 2002. Cette constance cache un changement des espèces en 2002 puisque la jussie (*Ludwigia* sp) n'a pas été recensée mais en revanche nous avons identifié du rorripe amphibie *Rorippa amphibia*.

L'espèce la plus fréquente est le myriophylle en épis, hydrophyte fixé, qui comme nous l'avons précédemment évoqué, n'est pas indicatrice d'un niveau particulier de trophie.

3.3 Fréquences relatives

Permettant d'apprécier l'importance des taxa présents, elles ont été calculées pour chaque taxon. Elles correspondent au nombre de points contacts comprenant ce taxon, sur le nombre total de points contacts. La Figure 6 présente les données calculées sur les deux mêmes stations que précédemment.

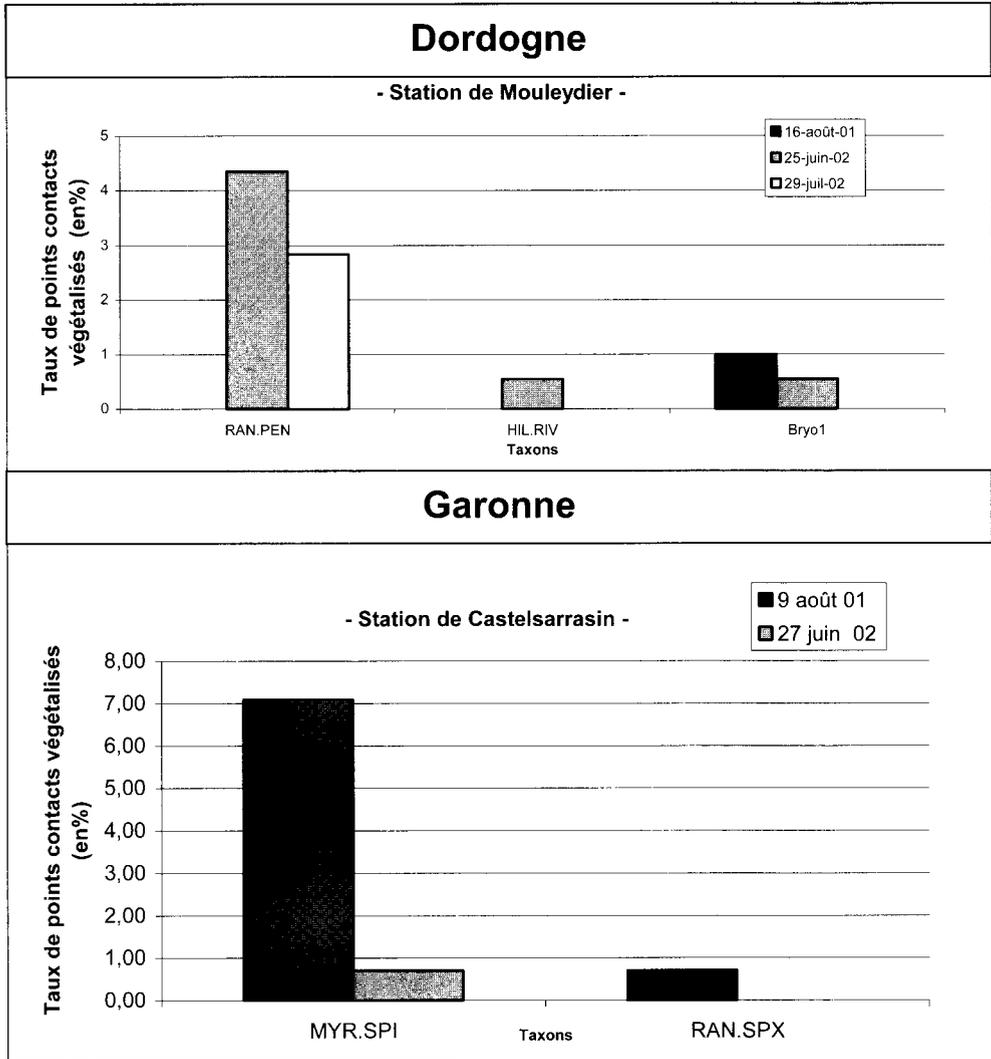


Figure 6 : Evolution interannuelle de la végétalisation sur les stations de Mouleydier et de Castelsarrasin

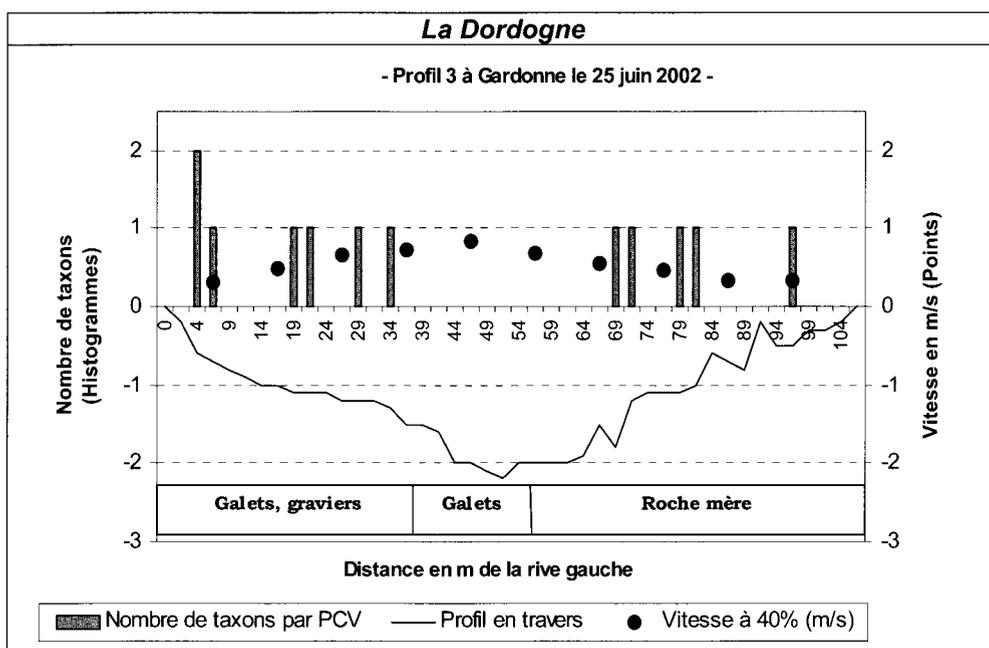
(RANPEN : *Ranunculus penicillatus* ; HILRIV : *Hildenbrandia rivularis* ; Bryo 1 : bryophyte non déterminé ; MYRSPI : *Myriophyllum spicatum* ; RANSPX : *Ranunculus* sp)

Sur la station de Mouleydier on observe un développement végétal notable après les crues de 2001, mais la campagne de juillet 2002 n'a pas confirmé cette tendance.

Sur la Garonne, un remplacement des taxa présents entre les deux années limite les interprétations qui peuvent être tirées des évolutions de ce paramètre.

3.4 Distribution de la végétation le long des profils

Sur l'ensemble des profils réalisés sur les deux cours d'eau, les macrophytes ont été logiquement observés plus fréquemment dans les zones de bordure. A titre illustratif, la Figure 8 représente un profil sur la station de Gardonne et à un autre sur celle de Lamagistère, relevés en juin 2002. Sur ces transects figurent également la nature du substrat et les vitesses mesurées à 40 % de la profondeur du point de mesure et de prélèvement (les mesures de vitesses de courant sont réalisées sur une partie des transects avec un intervalle de 10 m). La Figure 7 permet également d'observer la répartition des vitesses sur un profil de Lamagistère, mais cette fois à l'aide de l'ADCP.



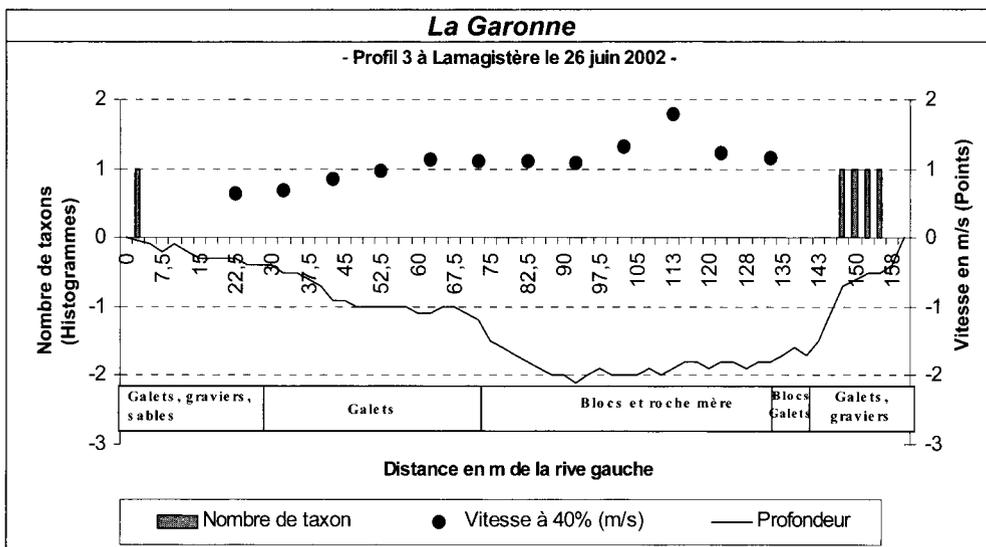


Figure 8: Répartition des taxons et de la vitesse sur deux profils, aux stations de Gardonne et Lamagistère (les mesures de vitesse présentées ici ont été réalisées à l'aide d'un courantomètre classique)

Ces transects mettent en évidence un zonage des macrophytes :

- une zone latérale végétalisée, correspondant à un faciès de type plat où les vitesses restent moins élevées que dans la zone centrale.
- une zone située vers le milieu du cours d'eau dépourvue de végétation, correspondant à un faciès plus profond où les vitesses sont plus élevées.

Ce zonage semble étroitement liée aux conditions hydrologiques et physiques, elles-même influant sur d'autres facteurs tels que la turbidité, la nature et la structure du substrat.

Sur les stations étudiées, les végétaux s'implantent de préférence sur des substrats de type graviers et galets plus ou moins colmatés par des sédiments plus fins. Toutefois à Gardonne et à Mouleydier, il est intéressant de souligner que certaines végétaux se développent dans les anfractuosités de la roche mère qui ménagent des micro-habitats favorables. Ainsi, le zonage des macrophytes apparaît-t-elle donc directement liée à la nature et la structure du substrat.

Une première analyse sur les données récoltées sur la station de Gardonne au mois de juillet, en utilisant une régression de Poisson, permet quelques commentaires. Cette station a été retenue à la fois parce qu'elle comporte le plus de points de prélèvements (205) et le plus de points contacts végétalisés (54). Les données ont été traitées sous le logiciel SAS (version 8.2).

Ils confirment que la profondeur est une variable qui influe notablement la distribution des taxons. Il s'agit d'une corrélation non linéaire. Les deux classes intermédiaires de profondeur, inférieures à 0,9 m sont significativement plus riches

en taxons que les classes extrêmes. Il serait intéressant de tester la variable vitesse de courant afin de savoir si cette distribution longitudinale est le résultat d'un effet de profondeur et/ou de vitesse.

L'analyse également appliquée à la variable du substrat ne met pas en évidence de corrélation significative entre la présence des taxons et la présence de galets ou de graviers. Cela peut être lié au fait que des colmatages peuvent se produire entre ces éléments grossiers du substrat et favoriser l'enracinement des phanérogames. En revanche, les dalles rocheuses ont un effet significativement dépressif sur la présence des végétaux.

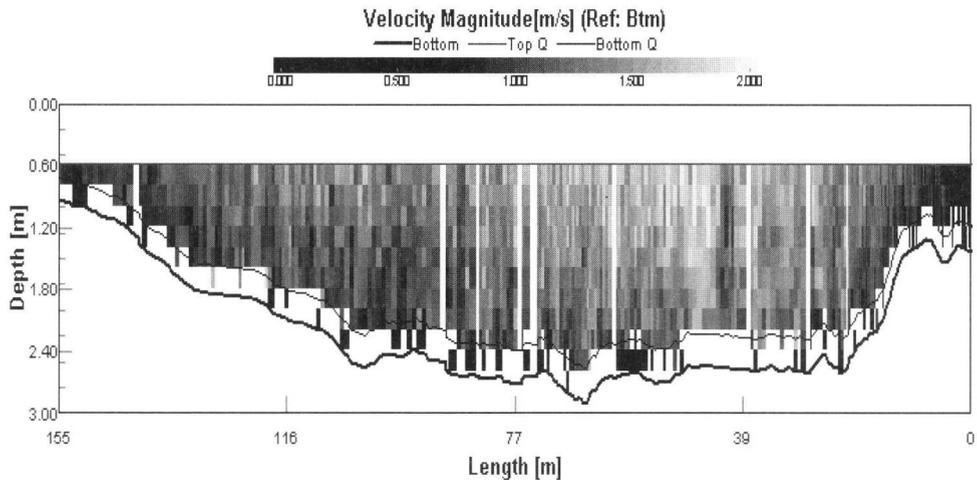


Figure 7 : Répartition des vitesses sur le profil N°3 de Lamagistère, campagne de mai 2003 (vitesses les plus faibles représentées en sombre et les plus rapides en clair)

L'ADCP permet d'obtenir des profils de vitesse où chaque colonne est constituée de cellules de vitesses de taille variable. Bien que présentant des zones blanches (non mesurées par l'appareil) près de la surface et en profondeur, ce système fournit néanmoins des champs de vitesses relativement complets et des valeurs de débit.

Sur le profil de vitesses obtenu à Lamagistère (Figure 7) on peut observer des vitesses plus réduites dans le fond du lit, où sont ancrés les macrophytes

3.5 Recouvrements végétaux sur les stations

Ils sont estimés en considérant que les recouvrements relatifs (exprimés en pourcentage), observés sur les points contacts et sur la zone prospectée à pied sont extrapolables à l'ensemble de la station (en prenant soin de soustraire les points contacts déjà pris en compte dans la zone de bordure).

Les résultats obtenus montrent que les macrophytes recouvrent une surface assez faible du lit mineur. En 2002, la station de Gardonne est la plus occupée avec seulement 1/10ème de sa surface recouverte par les végétaux alors que la station de Lamagistère n'est couverte qu'à 1% et que les stations de Mouleydier et de Castelsarrasin ont un taux de recouvrement d'environ 0.25%.

4. Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus à l'issue des campagnes de terrain réalisées sur la Garonne et la Dordogne confirment que l'implantation des macrophytes aquatiques est fortement liée à l'hydrologie et aux conditions hydrauliques de la rivière. Les variations de débit qui se traduisent par des vitesses et des profondeurs variables en fonction des saisons, constituent un élément déterminant pour le développement des végétaux. Ces résultats montrent que même dans la Potamon, les macrophytes peuvent constituer un élément structurel de l'habitat à ne pas négliger, et donc qu'il est justifié de le prendre en compte dans le diagnostic écologique d'ensemble des hydrosystèmes.

Néanmoins, les conditions de terrain sont particulièrement contraignantes. Des phénomènes de crues imprévisibles peuvent en effet empêcher la réalisation de campagnes de terrain. De même, la lourdeur des techniques de prélèvements oblige à trouver des compromis entre une méthodologie « idéale » et ce qui est effectivement réalisable. Ceci se traduit par un nombre limité de stations et de campagnes de terrain.

Le recours à des technologies de recueil de données de localisation géographique (GPS) et d'intégration des vitesses de courant et de la profondeur du lit permettant des mesures de débits en direct tout en conservant l'accès aux données ponctuelles de vitesses (ADCP) devrait nous faciliter l'acquisition des informations nécessaires à la constitution d'une base de données cohérente.

Pour pallier aux difficultés d'observations des substrats et des macrophytes de dimensions réduites comme les bryophytes, dans la plupart des conditions de profondeur et d'écoulement, nous prévoyons d'utiliser des techniques de caméra immergée qui devraient également nous aider à parfaire les investigations.

L'amélioration des connaissances sur la causalité des développements de macrophytes devrait permettre de préciser les modalités de la gestion de ces organismes partiellement garants de la qualité écologique des cours d'eau.

L'intégration spatiale et les changements d'échelle entre le point contact, le transect, la station et le linéaire de cours d'eau devraient permettre d'évaluer les effets de discontinuités liés aux barrages par rapport à l'effet de protection des berges et des zones marginales. D'ores et déjà, il s'avère que l'hydrologie et les modalités de gestion des barrages sont tout à fait déterminants quant aux possibilités d'implantation des macrophytes

Remerciement

Les auteurs remercient Hélène Hache et Patricia Bruneau pour leur travaux de DESS et DEA sur les macrophytes des grands cours d'eau, Matthieu Torre, Fabrice Pellote et Alain Lechene pour leur participation à l'acquisition des données, ainsi que l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et EPIDOR pour leur apport d'information sur la Garonne et la Dordogne.

BIBLIOGRAPHIE

Bernez I., 1999. *Végétation macrophytique des cours d'eau régulés*, Thèse ENSA de Rennes, 127 p.

Bernez I., Haury J., Ferreira M.T., 2002. Downstream effects of a hydroelectric reservoir on aquatic plant assemblages, *The Scientific World Journal*, 2, p. 740-750.

Bruneau P., 2002. *Dynamique des peuplements de végétaux aquatiques de grands cours d'eau et perception par les acteurs institutionnels. Application à la Garonne et à la Dordogne*, Cemagref, Unité de Recherche Qualité des Eaux, Museum National d'Histoire Naturelle, Rapport de DEA, 91p.

Codhant H., 1992. *Méthodologie d'étude des macrophytes aquatiques en grands cours d'eau. Estimation du recouvrement végétal. Type et effort d'échantillonnage*, Cemagref, Division Qualité des Eaux. Note, 10p.

Daget P., Godron M., 1982. *Analyse de l'écologie des espèces dans les communautés*, Masson, Paris, 163 p.

Daudin D., Dutartre A., 2000. *Pourquoi utiliser la technique des points contacts?* Cemagref, Unité de Recherche Qualité des Eaux, Note interne., 5 p.

Dawson F.H., 1988. Water flow and the vegetation of running waters. In: Symoens J.J. (ed.), *Handbook of vegetation science*, 15/1, *Vegetation of inland waters*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.283-309.

Gouesse Aidara L., 1986. *Biomasse, production, ph nom trie et composition minérale de quelques macrophytes des cours d'eau bretons*, Thèse Université de Rennes 1, 116p.

Grasmuck N., Haury J., L glize L., Muller S., 1995. Assessment of the bioindicator capacity of aquatic macrophytes using multivariate analysis, *Hydrobiologia*, 300-301, 115-122

Hache H., 2001. *Proposition d'un protocole d'observation des macrophytes aquatiques*, Cemagref, Unité de Recherche Qualité des Eaux, Université de Tours, rapport de DESS, 65 p.

Haslam S.M., 1978. *River plants*, Cambridge University Press, 396 p.

Haury J., Bernez I., Lahille V. 1996a. Influence de la retenue de Rabondanges sur les peuplements macrophytes de l'Orne, *Hydrologie dans les pays celtiques*, p. 283-290

Haury J., Peltre M. C., Muller S., Trémolières M., Barbre J., Dutartre A., Guerlesquin M., 1996b. Des indices macrophytes pour estimer la qualité des cours d'eau français : premières propositions, *Ecologie*, 27, 4, p. 233-244.

Haury J., Peltre M. C., Trémolières M., Barbe J., Thiebaut G., Bernez I., Daniel H., Chatenet P., Muller S., Dutartre A., Laplace-Treytoure C., Cazaubon A., Lambert Servien E., 2002. A method involving macrophytes to assess water trophy and organic pollution : the Macrophyte Biological Index for Rivers (I.B.M.R.) – Application to different types of rivers and pollutions. In Dutartre A. & Montel M.H. (Eds). *Gestion des plantes aquatiques (11th International Symposium on Aquatic Weeds – EWRS, Cemagref, Conseil General des Landes, INRA, ENSAR)*, p. 247-250. 3-7 sep 2002, Moliets et Maâ (40).

Janauer G.A., 1999. Macrophytes of the River Danube: a diversity of the Austrian stretch. *Archiv fürHydrobiologie*, 115/3, p.339-412.

Janauer G.A., Wychera U., 1999. Wasserpflanzen in der neuen Donau, biodiversität, Habitatstruktur und Nährstoffe. In *Perspektiven*, 2-3, p.37-42.

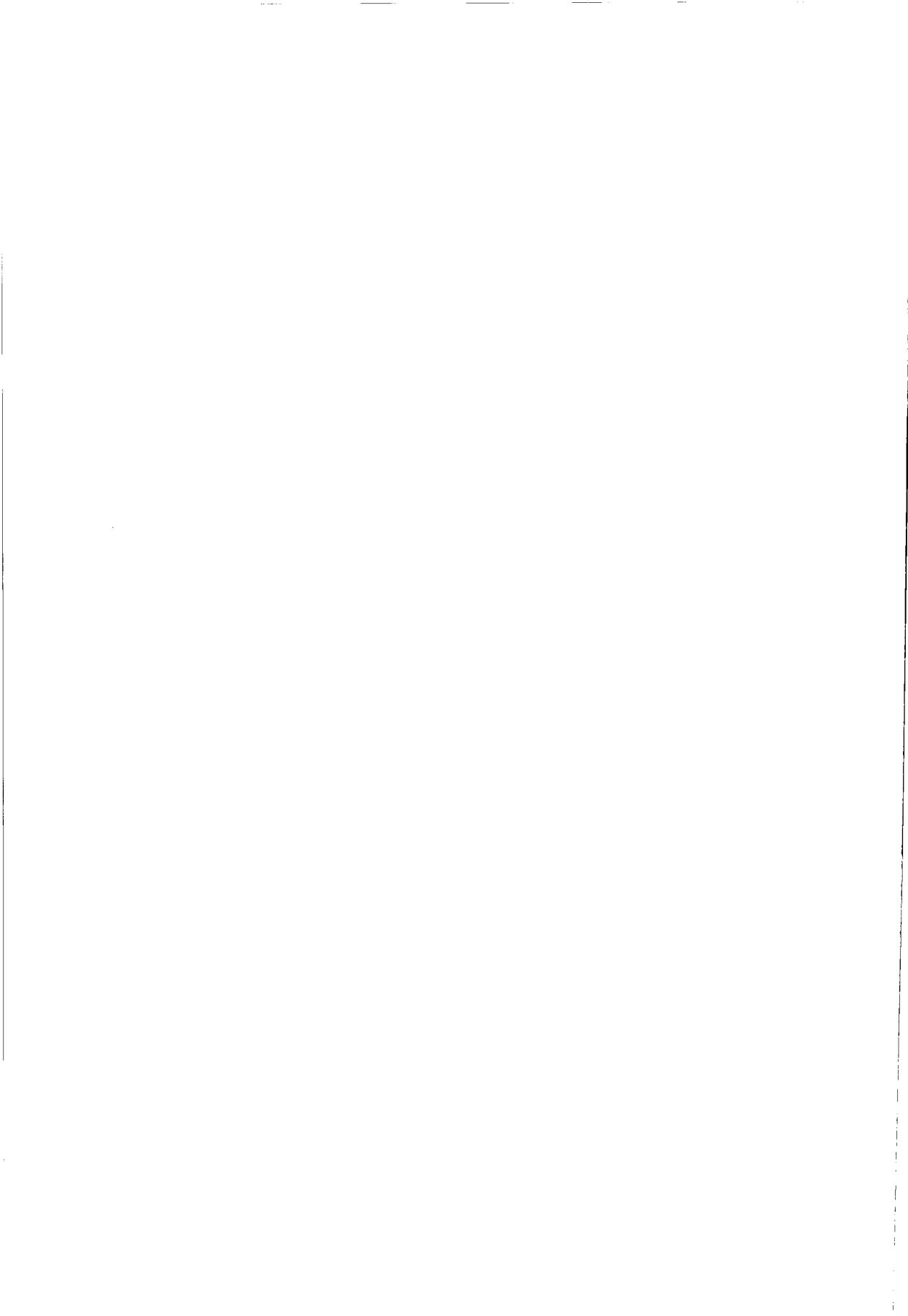
Kohler A. 1978. Methoden der Kartierung von Flora und Vegetation von Süßwasserbiotopen; *Landschaft + Stadt*, 10, p. 73-85.

Moreau A., Dutartre A., 2000. *Réseau de suivi des développements végétaux en cours d'eau dans le bassin Adour-Garonne – Proposition de mise en œuvre*. Cemagref, Unité de Recherche Qualité des Eaux, 52 p.

Raschke R.L. & Rusanowski P.C., 1984. Aquatic macrophyton field collection - Methods and laboratory analyses, p. 16-27. in *ECOLOGICAL ASSESSMENT OF MACROPHYTON - Collection, use and meaning of data*. ASTM Special technical publication 843. Dennis & Isom Editors. Baltimore. 122 p.

Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E., 1980. The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37, p. 130-137.

Wright J.F., Hiley P.D., Ham S.F., Berrie A.D., 1981. Comparison of three mapping procedures for river macrophytes, *Freshwater Biology*, 11, p. 369-379.



Le partenariat E.D.F.-U.N.P.F. : actions et travaux en faveur du milieu

Gérard GUILLAUD

Vice-Président de l'Union Nationale pour la Pêche en France et la Protection du Milieu Aquatique

L'Union Nationale pour la Pêche en France et la Protection du Milieu Aquatique qui représente deux millions de pêcheurs regroupés au sein de 4 200 associations membres de fédérations départementales est étroitement associée à l'élaboration du projet de réforme de la politique de l'eau.

La pêche associative française, figurant parmi les premières associations à militer pour la préservation des milieux aquatiques et la protection du patrimoine piscicole, à laquelle le législateur a dévolu, à ce titre, la délégation de missions d'intérêt général, ne peut que se féliciter de la préparation d'un texte législatif nouveau venant compléter le dispositif mis en place en 1964 puis en 1992.

L'eau est, pour tous, une ressource précieuse, vitale. Et pourtant, sa gestion au quotidien est cause de nombreux antagonismes d'intérêts. Faire le meilleur usage de l'eau revient à concilier au mieux les impératifs de :

- compétitivité : en effet, il est indispensable que l'hydraulique continue à fournir de l'électricité, permettant ainsi à E.D.F. de rester le premier producteur européen en énergies renouvelables.
- protection de l'environnement des ouvrages hydrauliques car leur production a un impact sur le milieu où elle s'exerce. Les caractéristiques de l'habitat des poissons se trouvent modifiées du fait : des variations thermiques des cours d'eau, de la diminution des débits pouvant même conduire à la disparition de cet habitat indispensable à l'accomplissement du cycle biologique d'une espèce. Par ailleurs, à proximité de ces ouvrages, on note un cloisonnement des populations piscicoles : entraver la montaison des géniteurs vers les zones de reproduction contribue à l'affaiblissement de l'espèce. Dès lors que les conditions de milieu sont modifiées, l'absence de flux génétique régulier entraîne une sensibilité supérieure de l'espèce. Enfin, dans les sections aménagées, les altérations liées à la qualité physique de l'eau se cumulent aux perturbations liées à l'hydroélectricité, aggravant par là même une situation déjà défavorable.

Un certain nombre d'actions ont été mises en œuvre par E.D.F. en concertation avec les pêcheurs tels par exemple les niveaux des débits réservés, la conduite des vidanges, des aménagements permettant la migration des poissons. C'est dans cet esprit, d'ailleurs, qu'un partenariat local E.D.F. Production Méditerranée et pêcheurs locaux a donné lieu, dans le cadre du Contrat de Rivière du Val de Durance, à l'étude, la réalisation, l'exploitation et l'entretien d'une passe à anguilles sur le seuil de la prise d'eau agricole du barrage de Bonpas ainsi qu'une passe à anguilles destinée au comptage des anguilles sur le barrage Mallemort.

Le partenariat EDF – UNPF

Afin de renforcer cette concertation ponctuelle, E.D.F. et l'U.N.P.F. ont engagé, il y a quatre ans, un dialogue suivi qui a conduit à la conclusion d'une convention entre les deux entités.

Ce partenariat vise à faciliter deux grandes familles d'actions :

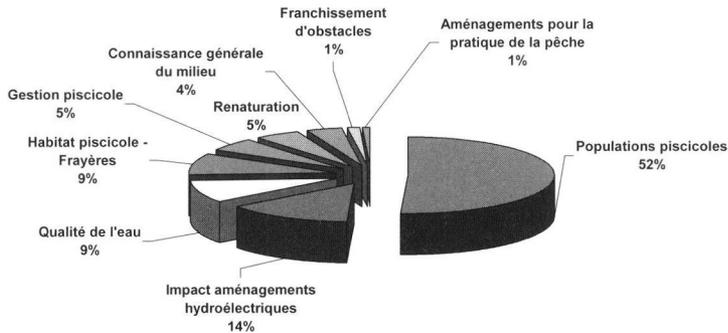
- Le développement du milieu associatif de la pêche en eau douce, par l'aide à l'acquisition de matériel pour les emplois-jeunes, le développement des écoles de pêche, la promotion du loisir pêche, l'installation de postes de pêche pour handicapés, l'aide à la mise en place des plans départementaux de gestion piscicole et de développement de la pêche.
- Les études et travaux pour la préservation des milieux aquatiques et de la ressource piscicole.

Depuis la mise en place du fonds début 2000, plus de 500 dossiers ont été examinés et 435 ont été subventionnés, pour un montant total de 1.350.000 € dont la moitié concernant des études ou des travaux pour améliorer le milieu. Ces dossiers provenaient de 82 départements métropolitains, plus l'île de la Réunion, témoignant ainsi d'une très bonne répartition géographique.

Il faut noter que 46 % des études et travaux financés ont un lien direct ou indirect avec la présence d'aménagements hydroélectriques EDF, permettant ainsi d'atténuer ou compenser les effets de ces aménagements.

Les études :

Pour une meilleure connaissance des milieux aquatiques et de la faune piscicole, afin d'améliorer la gestion piscicole ou la gestion des aménagements hydroélectriques.



Les études des populations piscicoles sont de plusieurs types :

- Etudes permettant de connaître le type de poissons présents dans un lac ou une rivière, ainsi que leur âge, pour décrire la structure de la population ; les habitats des différents types de poissons sont également recensés.
 - Exemples : études des habitats et peuplements piscicoles de la retenue EDF d'Eguzon sur la Creuse (23), études piscicoles sur les lacs EDF de Chaudanne et Castillon sur le Verdon (04) et sur le lac EDF de Guerlédan (22), mise en place d'un système de vidéosurveillance pour le suivi des populations piscicoles migratrices sur l'Allier (03)...
- Etudes scalimétriques (analyse des écailles des poissons) permettant un travail sur l'âge et l'origine génétique des poissons,
 - Exemple : financement de matériel pour la fédération de Savoie (73)
- Etudes génétiques permettant de déterminer les souches d'origine des poissons
 - Exemple : étude génétique sur la rivière Doubs (25)
- Recensement des cours d'eau abritant l'écrevisse à pattes blanches, espèce permettant de donner des indications intéressantes sur la qualité globale des cours d'eau.
 - Recensements effectués dans les départements de l'Indre et Loire (37), la Haute Savoie (74), la Charente Maritime (17), la Savoie (73), la Sarthe (72), le Jura (39)...

D'autres études permettent de définir des plans de gestion piscicole à l'échelle d'une rivière ou d'un bassin versant.

- Exemple : étude coordonnée de gestion piscicole du bassin du Lot (47), étude sur le rôle des alevinages sur la Neste d'Aure (65)

Les populations piscicoles sont également très sensibles à la qualité de l'eau des rivières. En particulier, la température de l'eau est un facteur déterminant, certaines espèces ne pouvant pas subsister dans des eaux trop chaudes.

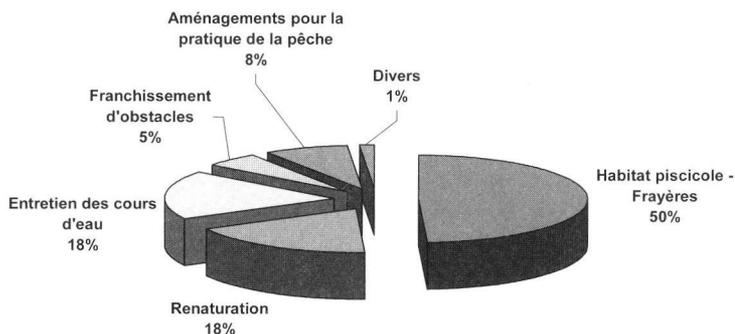
- Exemples : mise en place d'un suivi thermique annuel sur les cours d'eau de la haute Savoie (74), des Alpes Maritimes (06) ; étude de la qualité de l'eau du Gijou (81)...

Certaines études plus spécifiques permettent d'étudier l'impact des aménagements hydroélectriques gérés par EDF et de leur gestion (débits réservés, marnages des retenues, lâchers d'eau,...).

- Exemples : étude de l'impact de l'augmentation des débits réservés sur le torrent de Neuvache (aménagement de Valmeinier - 73), étude des variations de niveau d'eau et de température sur la Creuse (aménagement d'Eguzon / Roche aux Moines - 36).

Les travaux de préservation du milieu aquatique :

Création de frayères et amélioration des habitats piscicoles, restauration et renaturation de cours d'eau, aménagements de franchissement d'obstacles à la migration des poissons, le tout afin d'atténuer les effets des aménagements hydroélectriques et des autres actions humaines sur les rivières.



La majorité des fonds ont été utilisés pour la réalisation de frayères, pour les truites ou les brochets par exemple, ainsi que pour des opérations d'amélioration de l'habitat piscicole.

- *Exemples : travaux de restauration et d'aménagements piscicoles sur la Brenne (37), création de zones de reproduction naturelle du brochet sur la Jouanne (53), aménagement piscicole sur la Bourbre (38), création d'une frayère sur l'Aisne (02)...*

Les autres opérations concernent des opérations de renaturation de cours d'eau canalisés ou laissés à l'abandon en favorisant la création de milieux aquatiques variés, d'entretien des cours d'eau, ou des aménagements simples permettant le franchissement d'obstacles (digues, seuils) par les poissons.

- *Exemples : réhabilitation de la partie amont de l'Aubette de Magny (95), réhabilitation des rives de l'Yonne (58), renaturation du bras de Centron sur l'Isère moyenne (73), aménagements pour améliorer la vidange du lac de Saint Grat dans la vallée de la Gordolasque (06), entretien de la Claie (56),...*

Des aménagements pour améliorer les conditions de pratique de la pêche sur certains sites ont également vu le jour : aménagement de chemins d'accès, restauration de berges, création de sites d'accueil...

- *Exemples : restauration des rives de la Viosne (95) pour la pratique de la pêche, création d'un site d'accueil halieutique au moulin de l'Abbaye d'Ethival (72), aménagement d'un parcours de pêche sur le Lot (12)...*

Le fonds a également pu apporter des ressources pour des opérations de restauration de milieux aquatiques suite à certaines catastrophes climatiques qu'a connu le pays ces dernières années.

- *Exemples : réfection de berges sur Breilly et Heilly suite aux inondations de la Somme (80), travaux de restauration et de réhabilitation suite aux inondations dans le Gard (30).*

Exemples :

Réhabilitation de 3 frayères à brochets sur le Blavet (56)

Année : 2000

Contexte :

En aval de l'aménagement EDF de Guerlédan, le cours mineur du Blavet, sur lequel se situent entre autres 4 microcentrales EDF, a été remodelé depuis un siècle, le nombre et la surface des zones humides ayant été considérablement réduits.

Aujourd'hui, les zones humides résiduelles semblent convenir à la reproduction des cyprins mais sont très nettement insuffisantes pour le brochet. La réussite de sa reproduction est en effet fréquemment compromise par les variations de niveau d'eau liées à la gestion du canal et au fonctionnement des aménagements hydroélectriques.

Objectif :

De nombreux sites favorables à la reproduction du brochet ont été repérés mais leur fonctionnalité est altérée. Le principe consiste à restaurer ces fonctionnalités et protéger les frayères reconstituées des variations de niveau d'eau, ceci par un nettoyage végétal et un déboisement, puis un terrassement, la pose d'un vannage de protection, la végétalisation de la frayère et ses abords. Des panneaux informatifs sont ensuite mis en place.

Coût total estimé des travaux : 54 900 €

Participation fonds EDF-UNPF : 7622 € (14 %)



Création de zones favorables au recrutement de la truite fario sur le ruisseau de la Chenalette (73)

Année : 2001

Contexte : le ruisseau de Chenalette est un affluent de l'Isère, non loin de l'aménagement EDF de la Bathie.

Dans la zone concernée (commune de Tours en Savoie), le ruisseau adopte un tracé rectiligne et a subi de nombreuses dégradations. Les écoulements sont uniformes favorisant le colmatage des fonds, et l'absence d'entretien provoque la formation d'embâcles.

Objectif : les aménagements réalisés ont eu pour objectif principal de diversifier les écoulements trop uniformes par la mise en place d'enrochements et de seuils dans le lit du ruisseau de façon à augmenter les surfaces favorables à la reproduction piscicole.

Coût total estimé des travaux : 16 500 €

Participation fonds EDF-UNPF : 3148 € (19 %)

Opération expérimentale de gestion piscicole sur le lac EDF de Chaumeçon (58)

Année : 2003

Contexte : le lac de Chaumeçon est un lac de retenue situé sur la rivière Chalaux dans le parc naturel régional du Morvan. Il est classé en 2^{ème} catégorie piscicole. La retenue subit un marnage important, d'amplitude annuelle de 20 mètres, car les réserves du lac sont utilisées pour le soutien d'étiage de la Seine.

Le cheptel piscicole en place dans le lac n'est guère satisfaisant pour l'intérêt halieutique du site : biomasse dominée par des brèmes peu recherchées et des sandres âgés peu mordeurs.

Objectif : la proposition est d'initier à titre expérimental une opération de pêche exceptionnelle, effectuée par un pêcheur professionnel à l'aide d'engins adaptés, afin de prélever le maximum de brèmes et de gros sandres.

Les buts recherchés sont une redynamisation de l'ichtyofaune consécutive aux espaces libérés par les captures, afin de procéder ultérieurement un repeuplement de qualité.

Coût total estimé des travaux : 21 370 €

Participation fonds EDF-UNPF : 5432 € (25 %)

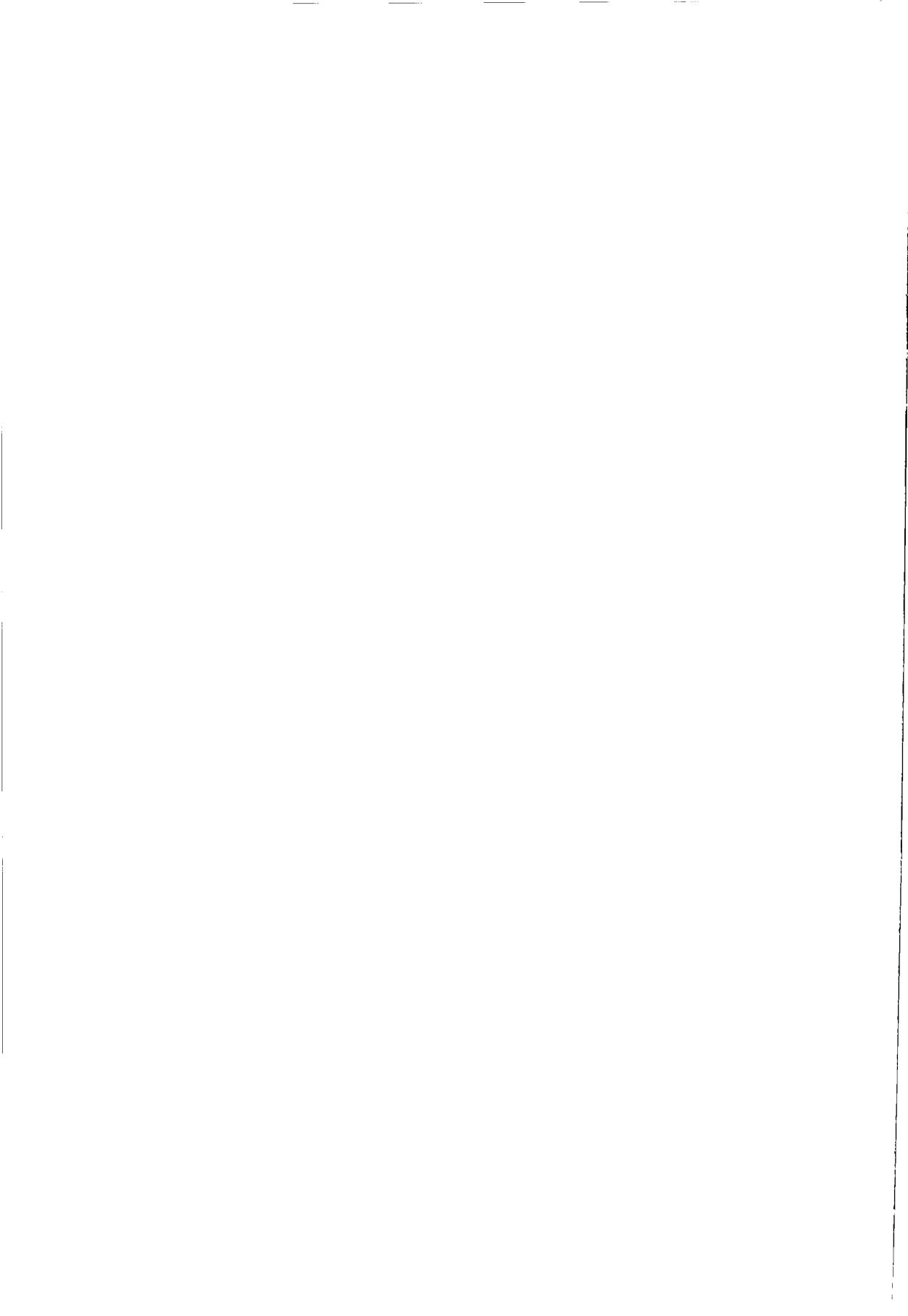


Le bilan global des actions de ce protocole est un constat des efforts engagés. Bientôt un retour d'expérience sur les résultats obtenus sera possible, afin de renforcer l'efficacité du protocole.

Le parc hydraulique confié à la gestion d'E.D.F. constitue un patrimoine industriel de première importance, en France. Il est aussi souhaitable que ses qualités écologiques globales s'enrichissent de qualités écologiques locales, dans les meilleures conditions. Les pêcheurs le souhaitent ardemment, et E.D.F. s'est engagée dans la qualité environnementale des installations industrielles. C'est là tout le sens de ce partenariat.

Session 4

**Domaines de recherche :
barrages et évolution du climat**



Examen de la stationnarité des écoulements du Rhône en lien avec la variabilité climatique et les actions humaines

Investigating non-stationarity in Rhone streamflows related to climate variability and human impact

Eric SAUQUET

Cemagref, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique
3 bis quai Chauveau, CP220, 69336 Lyon cedex 09
Tel. 04 72 20 87 78
Fax 04 78 47 78 75
E.mail : eric.sauquet@cemagref.fr

Muriel HAOND

Compagnie Nationale du Rhône, Direction de l'Ingénierie Technique
2 rue André Bonin, 69316 Lyon cedex 04
Tel. 04 72 00 69 62
Fax 04.72.10.66.62
E.mail : m.haond@cnr.tm.fr

Résumé

Cette communication s'intéresse aux analyses statistiques appliquées à la détection de changement dans les longues séries temporelles de débit. Les difficultés théoriques et pratiques sont rappelées. Une synthèse bibliographique des études régionales antérieures révèle l'absence de preuve d'un impact généralisé du changement climatique sur les écoulements. Trois tests ont été appliqués à un jeu de données du fleuve Rhône et de deux bassins réputés naturels. Ils explorent plusieurs aspects du régime hydrologique : débits moyens annuels, maxima annuels des débits instantanés et journaliers et nombre de crues par an. Les résultats montrent que l'hypothèse de stationnarité du régime n'est pas remise en cause. Les anomalies détectées localement peuvent être reliées aux actions humaines.

Abstract

*This paper investigates whether river flow data provide evidence of climate change. A brief outline of difficulties is first given. A review of regional studies of trend and variation in long time series over the world shows that no clear evidence of change emerges from these former statistical analyses. Three tests were applied on records from the Rhone river and from two tributaries free from influence. Several characteristics are examined: mean flow, annual instantaneous and daily peak flows, annual minimum of average **mean flow over ten days and the number of flood per year. The results demonstrate that the river flow regime for the Rhone basin remains unchanged at regional scale but suggest that trend or break detected at site can be explained by anthropogenic change.***

Mots-clés : Rhône, régime hydrologique, changement climatique, stationnarité

Keywords : Rhone, river flow regime, climate change; stationarity

Introduction

La question d'une modification du régime hydrologique de nos cours d'eau induite par une dérive climatique est au cœur des débats en cette année 2003 marquée par des températures estivales élevées et des étiages persistants exceptionnels. La crainte serait de constater les signes avant-coureurs d'une dérive climatique avec aggravation des extrêmes que ce soit en crue - ce qui remettrait en cause les dispositifs de protection contre les inondations - ou en étiage - avec des pressions accrues sur la gestion de la ressource en eau. Nous proposons de faire le point sur les analyses statistiques menées pour détecter des modifications dans les séries de débits. Nous rappellerons la difficulté de l'exercice et présenterons une synthèse bibliographique d'études déjà réalisées dans le monde. Des applications portant sur différents aspects du régime hydrologique du Rhône et de deux affluents seront ensuite proposées. Nous tenterons de distinguer ce qui est imputable aux actions humaines, de ce qui pourrait être dû à une dérive climatique.

1 Aspects méthodologiques

1.1 Difficultés théoriques et pratiques

Détecter une tendance ou rupture dans les séries de débit est un exercice délicat pour de multiples raisons (inventaire non exhaustif) :

- Le régime hydrologique de la rivière est la réponse du bassin versant aux pulsations climatiques. Il connaît une variabilité temporelle intrinsèque, usuellement synthétisée par une distribution statistique ajustée sur les réalisations passées. Un changement climatique occasionnerait une révision de la loi établie jusqu'alors ou l'usage d'une autre. Sauf perturbation majeure, la nouvelle gamme de valeurs possibles serait pour une grande partie recouvrante avec l'ancienne : les valeurs fréquentes deviennent – juste – un peu plus ou – juste – un peu moins probables. On cherche bien souvent une preuve d'une évolution dans des écarts infimes.
- De longues chroniques de données sont un pré-requis indispensable même si le changement ne devait s'opérer qu'en fin de XX^{ème} siècle. Pekarova et al. (2003) identifient par analyse spectrale des cycles de 14 à 30 ans sur les débits annuels des grands fleuves européens. Deux séquences complètes au minimum sont requises pour intégrer un échantillon représentatif de l'alternance des années sèches et humides, soit environ 50 ans. De telles séries sont malheureusement rares en France, ou difficilement accessibles, ou bien quand elles le sont, elles concernent des bassins versants ayant subi des actions humaines depuis plusieurs décennies et instrumentés pour des besoins de régulation du cours d'eau. Au signal naturel se greffe une perturbation anthropique qu'il convient de filtrer avant de conclure sur l'origine d'une éventuelle dérive.

- L'approche statistique apporte une aide à la décision concernant une hypothèse. Les calculs réalisés sur les échantillons conduiront à retenir l'hypothèse de stationnarité H_0 ou son alternative H_1 sachant qu'une seule est vraie. Il reste malgré tout des éventualités de se tromper : refuser H_0 alors que H_0 est vraie (risque de 1ère espèce) ou accepter H_0 alors que H_1 est vraie (risque de 2ème espèce).

1.2 Exemple de tests statistiques

Nous avons sélectionné trois tests, les deux premiers étant largement utilisés pour détecter deux types de modification.

Les tests reposent tous sur une variable de décision ou statistique T dont on connaît la distribution sous l'hypothèse H_0 . On peut alors définir les bornes d'un intervalle qui regroupe $(1-\alpha)$ % des valeurs que peut prendre la statistique si H_0 est vraie et y situer la valeur T prise pour l'échantillon analysé. Si T se situe en dehors de l'intervalle, la valeur est jugée peu plausible, donc H_0 est fautive. α est fixé par l'utilisateur (en général, $\alpha < 10\%$). Plus α est faible, plus l'intervalle est étendu, et on ne rejettera alors H_0 que dans des cas rarissimes.

Le test de Pettitt (1979) est un test adapté à la détection d'une rupture au sein d'une série chronologique de n valeurs $x_i, i = 1, \dots, n$. La variable test est définie par :

$$U(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{signe}(x_i - x_j) \text{ avec } \text{signe} \text{ telle que } \begin{cases} \forall x > 0, \text{signe}(x) = 1 \\ x = 0, \text{signe}(x) = 0 \\ \forall x < 0, \text{signe}(x) = -1 \end{cases}$$

dont on retient finalement $T = \max\{U(t) | t = 1, n\}$. On calcule ensuite p , probabilité de dépassement de la valeur k prise par la statistique T :

$$p = 2 \exp(-6k^2 / (n^3 + n^2))$$

Si p est supérieur à α , l'hypothèse de stationnarité est rejetée au seuil α .

Le second test basé sur le coefficient de corrélation ρ de Spearman permet d'identifier une tendance. On calcule la série r_i des rangs attribués aux valeurs de l'échantillon classées par ordre croissant. ρ est le coefficient de corrélation entre i et r_i . Pour $n > 30$, ρ suit approximativement la loi normale de moyenne nulle et de variance $1/(n-1)$. Une tendance est détectée si ρ est significativement différent de 0, i.e. :

$$|\rho| \sqrt{n-1} > u_{1-\alpha/2}$$

avec $u_{1-\alpha/2}$, quantile de la loi normale centrée réduite de fréquence au non dépassement $1-\alpha/2$.

L'originalité du test de Lang (Lang et al., 2003) est la variable examinée : m_i , $i=1, \dots, n$ le nombre cumulé de crues observées depuis le début de la chronique, ces crues étant définies par le dépassement d'un seuil de référence. On associe à chaque m_i un intervalle de tolérance à $\alpha\%$ [m_i^- ; m_i^+] autour de la valeur théorique de m_i . On décompte le nombre total de valeurs de m_i en dehors des n intervalles [m_i^- ; m_i^+] que l'on compare à une valeur critique obtenue sur un abaque.

2 Synthèse des études régionales de détection de non-stationnarité

Trois documents ont recensé les dernières études de stationnarité appliquées aux variables hydrologiques de toute nature (IPCC, 2001) ou plus spécifiquement aux débits (Pilon et Yue, 2002 ; Lang et al., 2003). Nous en retiendrons quelques-unes qui illustrent le recul nécessaire dans les conclusions compte tenu de la diversité des variables examinées, des tests appliqués, des pré-traitements opérés, des périodes considérées...

Au Canada, Zhang et al. (2001) et Burn et Hag Elnur (2002) s'accordent sur l'existence, le signe et l'origine de la dérive sur les débits moyens mensuels : la hausse des températures de fin d'hiver plus élevées entraîne une fonte du manteau neigeux plus précoce, d'où des écoulements accrus en mars et avril et réduits en mai et juin. Dans le centre du pays, Adamowski et Bocci (2001) décèlent une tendance régionale significative à l'augmentation des débits de crue tandis que Yue et Wang (2002) affirment qu'il s'agit d'une réduction. Il est difficile de trancher, voire de comparer : le réseau de mesure et les périodes d'observation considérés ne sont pas identiques. Pour les Etats Unis, il y aurait consensus sur les étiages qui seraient désormais moins marqués (Lins et Slack, 1999 ; Douglas et al., 2000).

En Amérique du Sud, Marengo et al. (1998) constatent l'absence de tendance significative à l'échelle de la région tropicale. Cependant sur la côte nord-ouest du Pérou, les volumes des crues tendent à se réduire. Les ouvrages hydroélectriques en seraient responsables car le comportement observé sur les débits est en désaccord avec l'augmentation des précipitations notée par ailleurs. Plus au Sud, Garcia et Vargas (1998) mettent en évidence une tendance à la hausse des écoulements mensuels et annuels depuis les années 1970 sur le Rio de la Plata, cette fois en cohérence totale avec des études similaires sur les précipitations.

Une rupture sur les maximaux annuels est détectée entre 1940 et 1950 en Océanie (Franks, 2002). Trop précoce, elle ne peut être attribuée à l'augmentation du taux de CO₂ des dernières décennies.

En Afrique, ce sont essentiellement des ruptures qui sont mises en évidence sur les écoulements annuels. Ces ruptures font écho à celles identifiées sur les pluies.

Périodes sèches et humides ont alterné de manière naturelle au cours du XX^{ème} siècle. Reste à savoir si la dernière rupture a une origine anthropique.

En Europe, Hisdal et al. (2001) s'intéressent aux étiages, mais ne décèlent rien de réellement tangible. Au Royaume Uni, les résultats des nombreux tests appliqués aux caractéristiques de crue ne remettent pas en cause le principe de stationnarité du régime des hautes eaux, et cela même en incluant les épisodes exceptionnels de l'année 2000 (Robson et al., 1998 ; Robson, 2002).

3 Application au Rhône

3.1 Le régime hydrologique du Rhône

Le Rhône, de par l'étendue de son bassin versant (98 000 km² dont 88 000 sur le territoire français) est soumis à un régime hydrologique complexe en liaison avec les différents climats et reliefs des régions rencontrées tout au long de son cours.

- Le Rhône suisse est un torrent alpestre alimenté par les eaux des montagnes voisines. Le régime est marqué par de basses eaux d'hiver et des crues de printemps et d'été dues à la fonte des neiges et des glaciers.
- De sa sortie du lac Léman jusqu'à Lyon le Rhône garde des caractéristiques hydrologiques similaires grâce à l'apport des affluents provenant des Préalpes et du Jura. Ainsi la fonte nivale continue à jouer un rôle essentiel dans l'alimentation du fleuve. Les crues de printemps sont plus marquées mais ne font pas disparaître l'influence de la fonte des glaciers sur le cours du Rhône supérieur.
- A Lyon, l'arrivée de la Saône modifie le régime du Rhône. Parcourant des régions de plaines soumises aux pluies océaniques, la Saône a un régime inverse de celui du Rhône lors de sa traversée de Lyon : hautes eaux d'automne et d'hiver, étiages d'été.
- En aval de Lyon, grâce à la Saône, le Rhône devient un fleuve puissant et plus régulier. Toutefois son régime hydrologique est à nouveau modifié lors de la traversée du sillon rhodanien avec l'apport de nouveaux affluents à régime nival venus des Alpes. Les affluents cévenols et méditerranéens ont un impact uniquement lors de brefs épisodes de crues intenses le plus souvent en automne. Pour le Bas Rhône, les risques d'étiages sévères sont centrés sur août à janvier avec une période plus critique entre septembre et octobre mais les masses d'eau fournies par les glaciers du cours supérieur empêchent cette tendance à aboutir à une pénurie véritable.

3.2 Evolution de l'anthropisation du bassin

L'influence humaine sur les débits du Rhône a débuté à la fin du XIX^{ème} siècle avec la régularisation du Lac Léman en 1888. La consigne d'exploitation du Léman a été remise à jour en 1964.

La grande période de construction des ouvrages hydroélectriques et des retenues sur le Rhône et ses affluents a débuté dès la fin de la seconde guerre mondiale et

était quasiment achevée dans le milieu des années 1970. La capacité utile des réservoirs existants actuellement est d'environ 7 milliards de m³ dont :

- 1.5 milliards situés dans sur le bassin suisse en amont du Léman ;
- 5.5 milliards sur le territoire français soit 10% du volume annuel écoulé par le Rhône à la station de BEUCAIRE près de son embouchure. Trois affluents concentrent à eux seuls plus de 85% du volume des retenues françaises : l'Ain (13%), l'Isère (30%) et la Durance (43%). Les retenues recensées sur le bassin de la Saône sont peu conséquentes et principalement destinées à la navigation.

Le régime du Rhône a également été modifié par des dérivations interbassins dont la principale est le transfert d'eau de la Durance vers l'Etang de Berre (mise en service en 1966).

Cet historique rapide de l'influence des aménagements sur le régime hydrologique du Rhône permet de distinguer pour le XX^{ème} siècle trois périodes (Fig. 1) :

- avant 1948 : les débits sont influencés seulement par la gestion du lac Léman ;
- 1949-1975 : période transitoire correspondant à la mise en service progressive des différents aménagements ;
- à partir de 1976 : l'aménagement du Rhône et de ses affluents peut être considéré comme quasiment achevé en 1976 avec près de 95 % de la capacité des retenues françaises en fonctionnement.

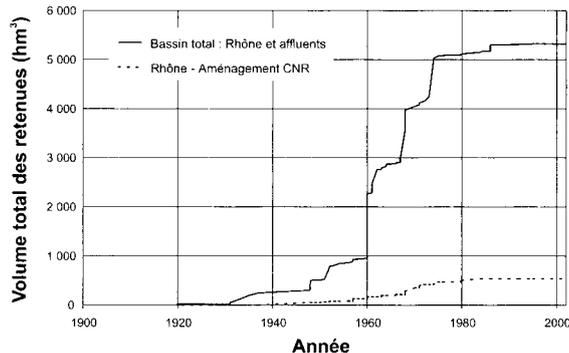


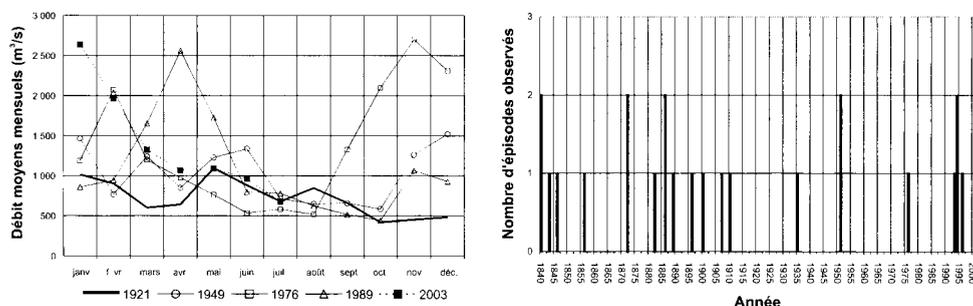
Figure 1 : Installation des retenues hydroélectriques françaises sur le bassin du Rhône (fleuve et affluents) au cours du XX^{ème} siècle

3.3 Quelques repères chronologiques

De par son régime hydrologique complexe, les étiages que peut connaître le Rhône sont rarement marqués puisque, presque toujours, la faiblesse des apports d'une partie du bassin est compensée par l'abondance relative due à un autre secteur du bassin. Cependant, le siècle passé a connu plusieurs années remarquables par leur faible hydraulicité : 1921, 1949, 1976, 1989 auxquelles nous pouvons ajouter 2003 (Fig. 2.a). La plus exceptionnelle est cependant 1921 remarquable par la durée des bas débits du fleuve qui ont persisté tout au long de

l'année : le débit seuil de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ a été dépassé en 1921 moins de 60 jours à la station de BEAUCAIRE alors que, pour une année normale, ce seuil est franchi pendant 275 jours.

La dernière décennie a été marquée par de puissantes crues du Rhône (oct. 1993, janv. 1994, nov. 1996, sept. 2002) qui n'avaient quasiment plus été observées depuis près de 40 ans, soit avant l'aménagement du fleuve. Or le XIX^{ème} siècle a connu des crues similaires et d'une ampleur bien plus grande en particulier en novembre 1840 et mai 1856 (Fig. 2.b).



(a) (b)
Figure 2 : Quelques aspects du régime hydrologique du Rhône à BEAUCAIRE – a : Débits moyens mensuels, b - Recensement des crues ayant atteint ou dépassé $8400\text{ m}^3/\text{s}$

3.4 Résultats des tests statistiques

Huit stations mesurant les débits du Rhône classées d'amont en aval ont été examinées. La confluence avec la Saône se situe entre PERRACHE et TERNAY. En complément et à titre de référence, deux bassins représentatifs de régimes naturels respectivement à influence océanique et nivale ont été ajoutés : la Saône à COUZON (29900 km^2) et l'Ubaye à BARCELONNETTE (549 km^2). Les variables analysées explorent différents aspects du régime :

- les débits moyens annuels QA sur les années hydrologiques ;
- les débits moyens sur une période consécutive de dix jours, minimaux dans l'année $VCN10$;
- les débits instantanés et journaliers maximaux annuels (resp. QIX et QJX) ;
- l'occurrence des événements supérieurs à un seuil, dépassé en moyenne deux fois par an (mt).

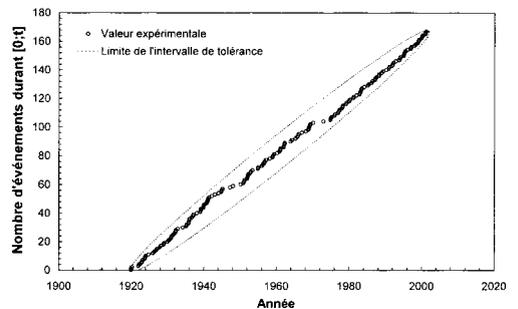
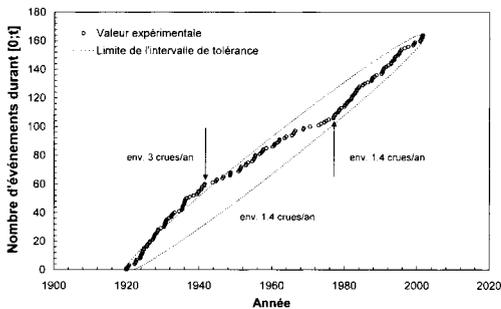
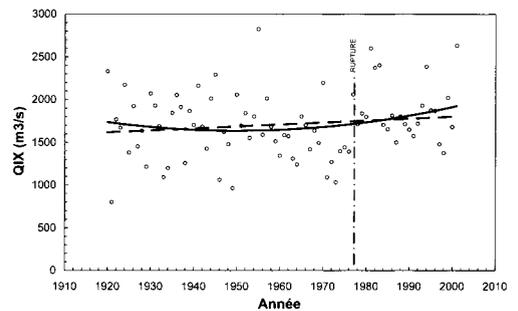
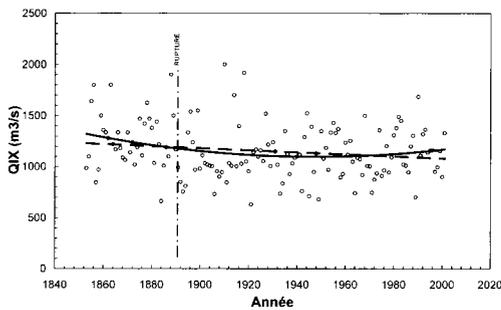
D'une manière générale, il n'y a que très peu de séries non stationnaires (6 sur 54 analysées). Aucun signal clair ne se dégage que ce soit dans les dérives ou ruptures identifiées :

- tendance à la réduction des pointes de crue pour deux stations du Rhône, à la hausse du débit d'étiage $VCN10$ sur une série du Rhône tandis qu'une évolution inverse s'observe sur la Saône ;
- certaines ruptures apparaissent de manière isolée et trop tôt pour être liées à un éventuel changement climatique : 1958 à PERRACHE et 1891 à

BOGNES tandis que d'autres plus tardives se concentrent autour de la fin des années 1970 ou du début des années 1940.

Station	Période	QA		QJXA		QIX		VCN10		mt
		P	S	P	S	P	S	P	S	
POUGNY	1925/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O
BOGNES	1920/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	1940-1980
	1853/2001	X	X	X	X	1891	▼	X	X	X
PONT DE LAGNIEU	1920/2001	1977	O	O	O	O	O	O	O	1940-1980
	1891/2001	X	X	X	X	O	O	X	X	X
PERRACHE	1920/2001	O	O	O	O	1958	▼	O	▲	1940-1980
TERNAY	1920/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1895/2001	X	X	X	X	O	O	X	X	X
VALENCE	1920/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1855/2001	X	X	X	X	O	O	X	X	X
VIVIERS	1920/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1910/2001	X	X	X	X	O	O	X	X	X
BEAUCAIRE	1920/2001	O	O	O	O	O	O	O	O	O
COUZON	1920/2001	O	O	O	O	1977	O	O	▼	O
BARCELON NETTE	1917/2002	O	O	O	O	X	X	O	O	O

Tableau 1 : Résultats des tests P (Pettitt), S (Spearman), L (Lang) (date rupture significative à 10%, tendance à la baisse ▼ ou à la hausse ▲ significative à 10%, stationnarité O, X chronique non disponible pour la période considérée)



Le Rhône à BOGNES

La Saône à COUZON

Figure 3 : Représentation graphique des tests statistiques

L'année 1891 marque une rupture dans la série des *QIX* à BOGNES selon le test de Pettitt, justifiée a posteriori par notre connaissance du fonctionnement du bassin. Cette date correspond approximativement à la mise en place des ouvrages sur le Léman avec pour conséquence un amortissement sur les crues en sortie du lac. Ce laminage des pointes n'influence que le Rhône supérieur puisqu'il concerne principalement les épisodes de fonte en provenance de Suisse (d'où une absence de rupture à VALENCE).

L'année 1958 n'est pas particulière vis à vis de l'aménagement du Rhône. Cette rupture serait artificielle et due à l'hétérogénéité dans les procédures d'acquisition des mesures (multiplicité des relations hauteur-débits, déplacement de la station...) avant 1957, date du début du suivi réalisé par la CNR.

Les ruptures en fin des années 1970 ont plus de consistance de par leur nombre. Elles pourraient être encore plus nombreuses si le seuil de rejet fixé à 10% devait être relevé à 15%. Elles marqueraient le début de décennies humides (LAGNIEU) et riches en épisodes de crue (COUZON). Serait-ce pour autant un signe de dérive climatique ? Rien n'est sûr. Sur les graphiques associés au test de Lang et même si la rupture n'est pas significative à 10%, nous identifions une période de relative accalmie sans crue majeure (1940-1975) entre des séquences qui contiennent en moyenne plus de deux épisodes par an. Ceci renvoie à la Figure 2.b. Nous retrouvons des épisodes d'ampleur identique à ceux de la fin de XIX^{ème} siècle avant aménagement. Nous serions donc à nouveau dans un cycle riche en crues relativement fortes et rapprochées dans le temps, déjà observé par le passé.

Conclusion

Cette présentation a pour objectif de faire le point sur la détection de changement dans les séries de débit. Nous avons donc réalisé une synthèse des travaux internationaux sur ce thème. Il en ressort une absence de signe réel de perturbation. Nous avons souhaité nous en assurer sur un cas test français : la partie française du bassin versant du Rhône. Conscient du contexte particulier, avec une anthropisation croissante, nous avons rappelé quelques dates-clefs en matière d'aménagement et de conditions hydrologiques passées. Trois tests appliqués à cinq variables caractérisant différents aspects du régime hydrologique ont permis de confirmer les résultats internationaux. Des anomalies ont pu être identifiées pour certaines stations et certaines variables, mais :

- elles ne sont pas suffisamment nombreuses et cohérentes avec les dates présumées de début de changement climatique pour accuser l'intensification de l'effet de serre ;
- l'évolution qu'elles impriment s'inscrit dans une variabilité naturelle du régime hydrologique ;
- elles peuvent être expliquées par des actions humaines.

Les éléments présentés sont des résultats préliminaires d'un projet de recherche en cours, « Détection de changements éventuels dans le régime des crues » soutenu financièrement par le Programme National de Recherche en Hydrologie et auquel participent le Cemagref (Lyon), l'UMR HydroSciences (Montpellier), Météo-France (Toulouse) et le LTHE (Grenoble). Il restera à les confirmer ou les infirmer par une analyse prévue qui s'étendra à toute la France.

Bibliographie

- Adamowski K. et Bocci C., 2001. Geostatistical regional trend detection in river flow data. *Hydrol. Process.*, 15(18): 3331.
- Burn D.H. et Hag Elnur M.A., 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *J. Hydrol.*, 255(1-4): 107-122.
- Douglas A., Vogel R.M. et Kroll C.N., 2000. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.*, 240(1-2): 90-105.
- Franks S.W., 2002. Identification of a change in climate state using regional flood data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6(1): 11-16.
- García N.O. et Vargas W.M., 1998. The temporal climatic variability in the Río De La Plata basin displayed by the river discharges. *Clim. Change*, 38(3): 359-379.
- Hisdal H., Stahl K., Tallaksen L.M. et Demuth S., 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *Int. J. Climatol.*, 21(3): 317-333.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. et White K.S. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 1032 p.
- Lang M., Bois P., Mestre O., Niel H. et Sauquet E., 2003. Détection de changements éventuels dans le régime des crues. Rapport de 1^{ère} année, projet PNRH, juin 2003, 75 pages.
- Lins H.F. et Slack J.R., 1999. Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letters*, 26(2): 227-230.
- Marengo J.A., Tomasella J. et Uvo C.R., 1998. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil and northwestern Peru. *Journal of Geophysical Research*, 103(D2): 1775-1783.
- Pekárová P., Miklánek P. et Pekár J., 2003. Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th-20th centuries, *J. Hydrol.*, 274(1-4): 62-79
- Pettitt, A.N., 1979. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Applied Statistics*, 28(2): 126-135.
- Pilon P.J. et Yue S., 2002. Detecting climate-related trends in streamflow data. *Water Sci. Technol.*, 45(8): 89-104.
- Robson A.J., 2002. Evidence for trends in UK flooding. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 360(1796): 1327-1343.
- Robson A.J., Jones T.K., Reed D.W. et Bayliss A.C., 1998. A study of national trend and variation in UK floods. *Int. J. Climatol.*, 18(2): 165-182.
- Yue S. et Wang C.Y., 2002. Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation. *Int. J. Climatol.*, 22(8): 933-946.
- Zhang X., Harvey K.D., Hogg W.D. et Yuzyk T.R., 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resour. Res.*, 37(4): 987-998.

Les émissions de gaz à effet de serre par le réservoir de Petit Saut en Guyane

Greenhouse gases emissions from the Petit Saut reservoir in French Guiana

Alain GREGOIRE

EDF, CIH

Savoie- Technolac

73373 Le Bourget-Du-Lac

Tel : 04 79 60 61 74

Fax : 04 79 60 62 98

E-mail : alain.gregoire@edf.fr

Sandrine RICHARD

Hydreco

Laboratoire Environnement

BP 823

97388 KOUROU Cedex (Guyane française)

Tel : 05 94 32 73 02

Fax : 05 94 32 21 29

E-mail : sandr.richard@wanadoo.fr

Résumé

La mise en eau d'un réservoir peut, en cas d'immersion d'une biomasse végétale importante, engendrer, entre autre, la formation de gaz à effet de serre (GES), méthane et gaz carbonique, soupçonnés de contribuer, à terme, au réchauffement de la planète.

Ce sont, en fait, les cinétiques d'évolution de la qualité de l'eau du réservoir qui expliquent l'intensité des flux d'émission de GES vers l'atmosphère. La communication rapporte la situation étudiée au droit du réservoir de Petit Saut. Cet aménagement hydroélectrique édifié en Guyane française, au cœur de la forêt primaire, a présenté, les premières années suivant le remplissage de la retenue, des émissions de GES comparables à celles qu'auraient produites des centrales thermiques de même puissance. Toutefois, les extrapolations effectuées sur une durée de fonctionnement de 100 ans, montrent que l'hydroélectricité reste, sur ce point, nettement moins polluante que le thermique.

Abstract

The creation of a reservoir can lead to the generation of greenhouse gases (GHG) if a large amount of vegetation is flooded. Methane and carbon dioxide are suspected of contributing to the Planet global warming.

In fact, GHG emissions to the atmosphere from a reservoir are dependent on the water quality. This paper deals with the situation that took place in Petit Saut reservoir located in the heart of the French Guiana primary rainforest. During the first years following the impoundment of the reservoir, the GHG emissions from Petit Saut hydroelectric site are similar to those from a thermal power plant of equivalent power output. However, comparison of GHG emissions on a 100 years timescale, reveal that hydroelectricity is, on this point, less polluting than thermal alternatives.

Mots-clés : Gaz à effet de serre, hydroélectricité, milieu tropical, Petit Saut

Keywords : Greenhouse gases, hydroelectricity, tropical environment, Petit Saut

Introduction

Dans la plupart des barrages réservoirs édifés 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 envoyée est importante et, comme le montre le retour d'expérience, que le temps de renouvellement est long. En profondeur, la décomposition anaérobie de la matière organique submergée conduit à la formation d'éléments dissous comme l'ammonium (NH_4^+), le fer ferreux (Fe^{++}), le méthane (CH_4), le gaz carbonique (CO_2) et l'hydrogène sulfuré (H_2S). La quantité de gaz à effet de serre (CH_4 et CO_2) émise à l'atmosphère dépend des cinétiques d'évolution de ces éléments dans le réservoir.

A Petit-Saut, en Guyane (Fig.1), la création de la retenue a entraîné l'immersion d'environ 360 km² de forêt primaire représentant de l'ordre de 8 millions de tonnes de carbone, litière comprise (Grégoire A. et Richard S., 2002).

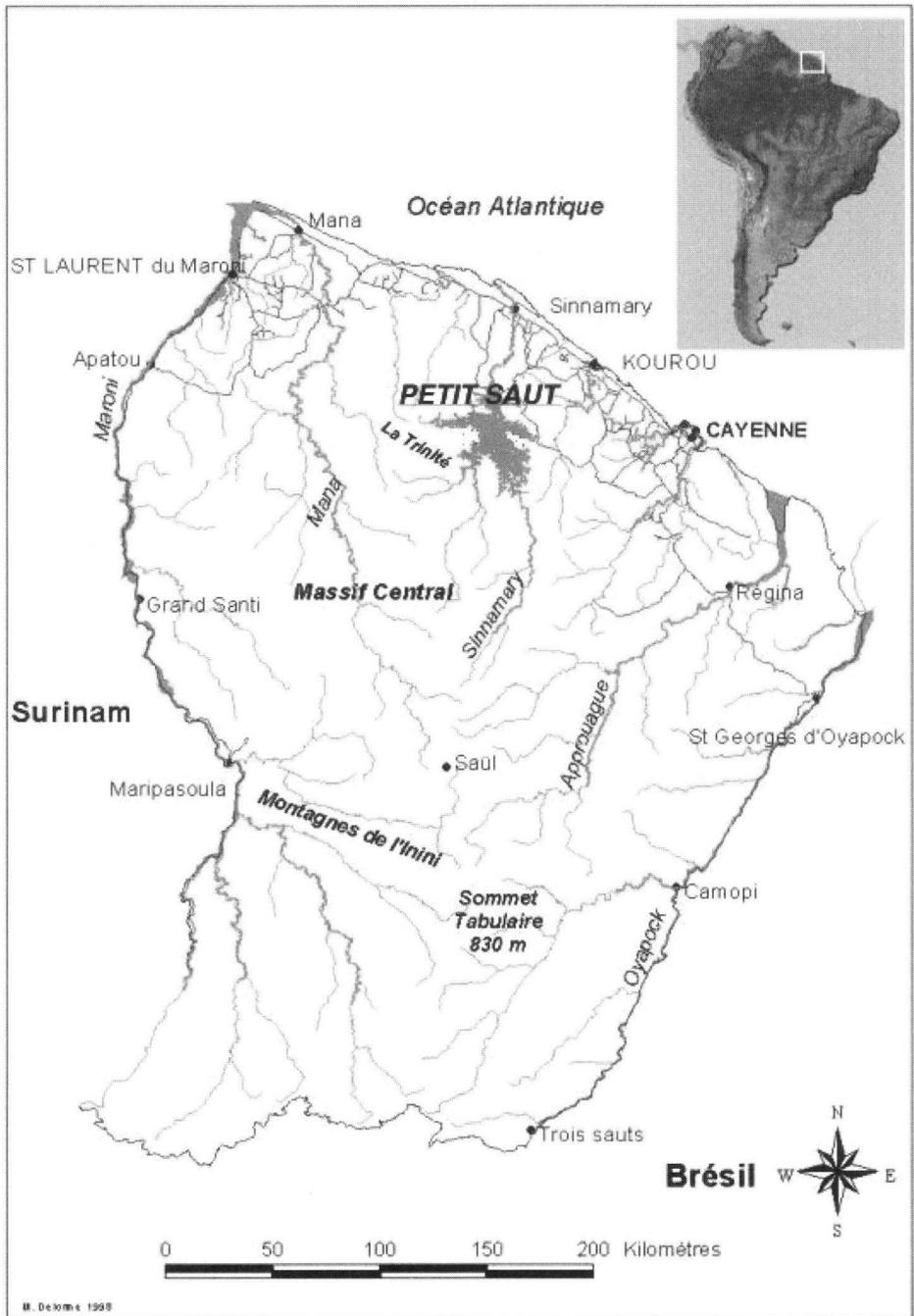


Fig. 1 Carte de situation de la Guyane

1. Données sur la qualité de l'eau

1.1 Méthodologie

Le suivi de 25 paramètres physico-chimiques (Richard S., 1996) pendant les 18 mois qu'a duré la mise en eau, a permis de suivre l'évolution de la qualité de l'eau de façon très précise. Le programme de mesures a été en effet adapté de manière à comprendre les relations existant entre les principaux processus mis en jeu. Ainsi :

- les teneurs en méthane et en oxygène, la température et la conductivité ont été 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 concentrations en oxygène ainsi que la température, la conductivité et le pH étaient enregistrés en continu en 2 stations automatiques 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, DCO), le potentiel Redox, le fer, les pigments chlorophylliens, les M.E.S.... étaient mesurés bimensuellement.

Les analyses courantes ont été réalisées selon des méthodes normalisées. Pour les analyses de gaz dissous (CH_4 et CO_2) sur les échantillons d'eau prélevés à différentes profondeurs à l'aide d'une pompe péristaltique, l'analyse est réalisée selon le protocole du « headspace » (Galy-Lacaux C., 1996) à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse.

L'oxygène dissous est analysé in situ avec une sonde WTW OXY 196.

1.2 La retenue

Dès la mise en eau des réservoirs tropicaux, les conditions climatiques provoquent l'installation rapide (en quelques semaines) d'une stratification thermique bien marquée, surtout en saison sèche. Cette stratification conduit à un épilimnion oxygéné et un hypolimnion totalement anoxique. Les teneurs en oxygène des couches de surface augmentent en saison sèche où l'ensoleillement est maximal, la photosynthèse active et les apports du bassin versant réduits. A l'inverse, en saison des pluies, la stratification est fragilisée par l'effet de dilution.

A Petit Saut, depuis la deuxième année suivant la fermeture du barrage, la qualité de l'eau de la partie supérieure de la masse d'eau n'a pas cessé de s'améliorer. La chimiocline située à quelques dizaines de centimètres sous la surface la première année (Richard S. *et al.*, 1997) a atteint environ 6 m aujourd'hui.

Deux causes principales concourent certainement à cette tendance :

- la clarification des eaux favorise l'activité photosynthétique (Vaquer *et al.*, 1997) ;
- la mobilisation du matériel réducteur résultant de la matière organique facilement dégradable s'atténue.

La persistance d'un hypolimnion presque en permanence totalement anoxique montre que les réactions de dégradation prédominent dans le fond de la retenue. Les bactéries méthanogènes en abondance au niveau du sédiment sont à l'origine de la formation du méthane et du gaz carbonique. Après être restées pendant plus de 5 ans, en toutes saisons, à des niveaux très élevés (jusqu'à 15 mg.l⁻¹), les teneurs en méthane de l'hypolimnion commencent à diminuer significativement (Richard S. et Cerdan P., 2003) ; les moyennes des concentrations en méthane dissous mesurées sur la colonne d'eau sont réduites de moitié (Fig.2).

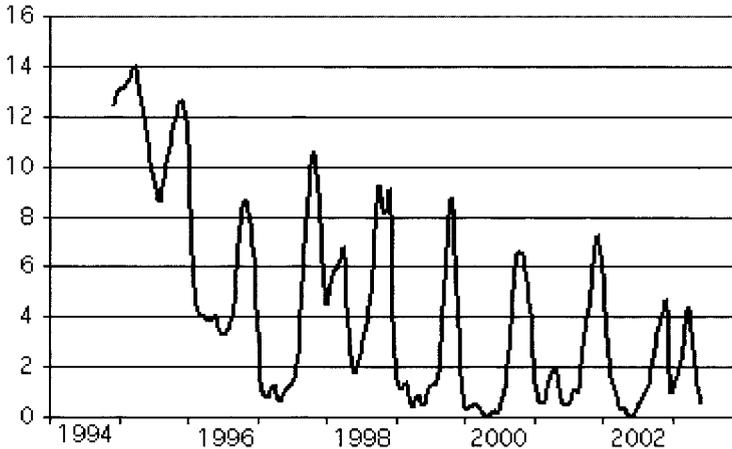


Fig. 2 : Evolution des concentrations moyennes en méthane dans la colonne d'eau du réservoir de Petit Saut depuis la mise en eau

1.3 La rivière aval

La qualité de l'eau de la rivière aval est bien sûr fortement liée aux variations de la qualité de l'eau de la retenue ainsi qu'à son mode de gestion.

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⁻¹ était restitué à l'aval du barrage, par les pertuis de fond. Dans cette configuration où les turbines sont à l'arrêt, 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 permet une réoxygénation 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).

Toutefois, comme l'illustre la figure 3, les analyses physico-chimiques effectuées le long du fleuve jusqu'à l'entrée de l'estuaire, montrent, alors, une décroissance systématique de l'ordre de 3 à 4 mg.l⁻¹, des teneurs en oxygène dissous sur 40 km. Cette diminution veut donc dire que sur le parcours aval, la consommation en oxygène dissous dans la rivière, d'origine biologique et chimique, est supérieure

aux apports d'oxygène par échange physique à l'interface eau-atmosphère. Du fait de l'absence de toute turbulence sur le tronçon aval, les échanges physiques à ce niveau sont faibles dans le Sinnamary.

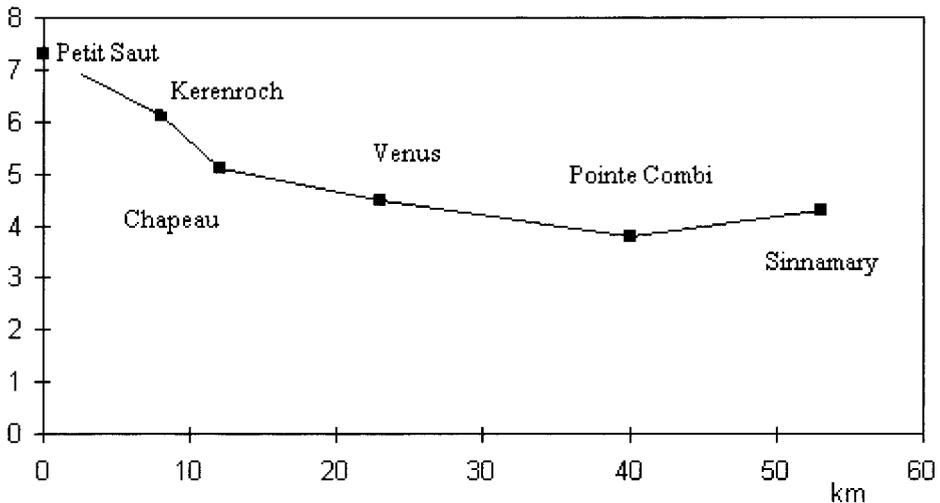


Fig 3 : Distribution des teneurs en oxygène dans le tronçon de rivière compris entre le barrage de Petit Saut et l'estuaire, avant la construction du seuil aérateur

Après mise en service des turbines

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 par la surface ou les pertuis de fond, et l'eau désoxygénée, transitant par les turbines.

Compte tenu du profil amont aval d'oxygène dissous enregistré avant les essais de turbinage, on pouvait s'attendre à ce qu'un rapport de mélange 50/50 suffise pour dépasser, en tout point du Sinnamary, le seuil de 2 mg.l⁻¹ d'oxygène défini, lors d'études préalables, comme suffisant pour garantir une vie aquatique normale pour la très grande majorité des espèces aquatiques. Or, les premiers essais de turbinage ont montré que le rapport de dilution devait être de plus en plus élevé dans le temps pour garantir le seuil fixé.

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 de la cause de ce phénomène. 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, est apparu à l'origine de la détérioration de la qualité de l'eau en période de turbinage (Gosse P. et Grégoire A., 1997). En fait, les importants remous en sortie des vannes de fond, permettent la réoxygénation de l'eau en même temps que le dégazage du méthane.

Galy-Lacaux C. et al. (1996) puis Richard S. et al. (1997), ont montré que l'oxydation du méthane d'origine hypolimnique restitué à l'aval du barrage, se fait

en moins de 2 jours. Ce temps correspond au parcours des masses d'eau entre le barrage et l'estuaire pour un débit de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De plus, il a été montré que $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ de méthane crée un puits d'oxygène dissous proche de $3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ dans le Sinnamary aval.

2. Les émissions de gaz à effet de serre (GES)

2.1 Méthodologie

Le suivi de l'évolution des flux d'émission de GES (CH_4 et CO_2) a été réalisé par le Laboratoire d'aérodologie de Toulouse à l'occasion de campagnes bi-annuelles sur l'ensemble de la retenue de Petit Saut ainsi que dans le tronçon de rivière à l'aval du barrage (Galy-Lacaux C. et al., 1997).

Les flux diffusifs sont mesurés à l'aide de chambres statiques flottantes de $0,2 \text{ m}^2$. Les flux sont calculés à partir de la pente d'une droite de régression représentant la concentration des GES dans la chambre en fonction du temps (Delmas R. et al., 1992).

Les émissions par bullage sont mesurées à l'aide d'entonnoirs renversés et partiellement immergés flottant à la surface de l'eau (Keller M. et Stallard R.F., 1994).

Les flux de GES au niveau du seuil aérateur sont évalués à partir des moyennes de concentrations de gaz dissous dans la colonne d'eau du réservoir et le débit turbiné.

2.2 Le réservoir

Comme rapporté précédemment, dans la plupart des réservoirs tropicaux que nous avons pu prospecter, la décomposition de la biomasse submergée conduit à la libération, sous forme de gaz carbonique, du carbone stocké. Toutefois, du fait des conditions d'anaérobiose régnant au fond des retenues, du gaz méthane est produit souvent en grande quantité au niveau des sédiments. Une partie du méthane est oxydée dans la masse d'eau et le reste est émis à l'atmosphère. Ces émissions se produisent de 2 façons différentes :

- par diffusion à la surface pour l'ensemble du lac,
- par bullage dans les zones où la profondeur est inférieure à 10 mètres.

Comme pour la formation du méthane dans la masse d'eau, dès la mise en eau du réservoir les émissions de GES sont apparues et n'ont cessé d'augmenter pour atteindre un maximum vers la fin de la première année. Ensuite, malgré la persistance de très forte teneur en méthane dans la colonne d'eau, une très nette décroissance des flux de GES s'est produite jusqu'à une quasi disparition des flux diffusifs de méthane au bout de 3 ans; seules subsistent les émissions de CO_2 . Ce phénomène est attribué au développement d'importantes colonies de bactéries méthanotrophes qui oxydent le méthane au niveau de l'oxycline (Delmas R. et al., 2001). En ce qui concerne les émissions de GES sous forme de bulles, le phénomène, bien qu'en voie de diminution, perdure encore 8 ans après. Il devrait se stabiliser dans les années futures à l'image de la situation dans le réservoir de

Gatun au Panama où, d'après Keller M. et al.(1994), 80 ans après la mise en eau, les émissions par ébullition restent notables.

Les flux moyens d'émission, à la fin de la première année, étaient de $1,183 \text{ t.j}^{-1}$ pour le méthane et de $3,740 \text{ t.j}^{-1}$ pour le CO_2 (Galy-Lacaux C. et al., 1997). Aujourd'hui, ils ne sont plus que de l'ordre de 50 kg pour le CH_4 et de 2 tonnes pour le CO_2 .

2.3 La rivière aval

Comme signalé au § 1.3 , l'eau turbinée au barrage de Petit Saut est anoxique et très chargée en méthane. Pour protéger la vie aquatique, EDF a dû construire un dispositif capable de réoxygéner l'eau et d'éliminer une grande partie des gaz réducteurs. La solution finalement retenue a été un seuil à 2 lames déversantes de 5,40 m au maximum de chute dont l'efficacité s'est avérée excellente. Néanmoins, de par même l'objet de sa conception, les GES contenus dans l'eau turbinée sont largués en grande quantité à l'atmosphère. Les flux mesurés à ce niveau sont aujourd'hui beaucoup plus importants que ceux mesurés sur l'ensemble du réservoir . Lorsque la centrale turbine à pleine puissance (débit turbiné de $440 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) les émissions de méthane et de gaz carbonique au droit du seuil sont de l'ordre respectivement de 150 tonnes et 1500 tonnes par jour. Sur le reste du parcours aval, du fait de l'absence de turbulences notables, les émissions de méthane représentent seulement 2 t.j^{-1} .

3. Conclusions

L'émission dans l'atmosphère de méthane, principal gaz à effet de serre, nous a conduit à étudier le rôle des réservoirs tropicaux en tant que contributeurs à l'effet de serre pour la planète. Les valeurs acquises à Petit Saut montrent qu'à partir de la troisième année suivant la mise en eau, c'est au niveau du seuil que les émissions de gaz à effet de serre sont, de loin, les plus importantes (plus de 1000 fois celles mesurées à la surface du réservoir. D'après Galy-Lacaux C. et al. (1997), seulement 20% des teneurs en méthane dissous sont largués à l'atmosphère durant le transit de l'eau entre l'aval du seuil et l'estuaire. On peut penser ainsi que, sans le dispositif de réaération, la plupart du méthane contenu dans l'eau turbinée serait oxydé au cours du temps. Mais comme signalé ci-dessus, la conséquence serait une forte désoxygénation de la rivière, surtout dans le tronçon le plus aval.

Les résultats obtenus à Petit Saut montrent que les réservoirs tropicaux peuvent émettre des quantités relativement importantes de gaz à effet de serre les premières années suivant la mise en eau. Toutefois, pour relativiser leur rôle en tant que contributeur au réchauffement de la planète, il est intéressant de les comparer, sur ce plan, aux moyens de production d'électricité d'origine thermique. Ce calcul a été réalisé par Delmas R. et al. (2001) pour une période de 100 ans, échelle de temps adoptée par le protocole de Kyoto, sur la base du « Global Warming Potentiel » (GWP). Ce concept, reconnu par l'IPCC (« Intergovernmental Panel on Climate Change») prend en compte à la fois le pouvoir radiatif et le temps de vie des gaz.

Les prévisions reposent sur les résultats des études menées à Petit Saut ainsi que sur les données acquises sur des réservoirs plus anciens comme Buyo en Côte d'Ivoire et Gatun au Panama. Les émissions cumulées sur 100 ans sont ainsi estimées à environ 30 Mt CO_{2eq} avec une incertitude comprise entre 7 et 54 Mt CO_{2eq}. Cette dernière est importante due notamment aux imprécisions concernant:

- les variations des conditions hydrologiques affectant le réservoir dans les années à venir (Galy-Lacaux C. et al., 1997),
- l'évolution du rapport, dans la retenue, entre les quantités de matière organique d'origine autochtone et allochtone,
- la cinétique d'évolution du méthane dans l'atmosphère.

Sur la base des valeurs de facteurs d'émission données par Environment Canada (1992) et des consommations de combustibles fournies par EDF, les émissions de GES à l'atmosphère pour une centrale thermique de même puissance installée (115 MW) que celle de l'usine hydroélectrique de Petit Saut sont, d'après Delmas R. et al.(2001), de 77 tCO_{2eq} pour le fuel, 98 t CO_{2eq} pour le charbon et 64 t CO_{2eq} pour le gaz (Fig.4). Par conséquent, pour une puissance donnée, les émissions de GES sont nettement inférieures pour l'hydroélectricité que pour le thermique. Cette situation s'explique par le fait que les émissions de GES diminuent au fil du temps depuis les premières années suivant la mise en eau du réservoir ; celles engendrées par les centrales thermiques restent constantes pendant toute leur durée de vie.

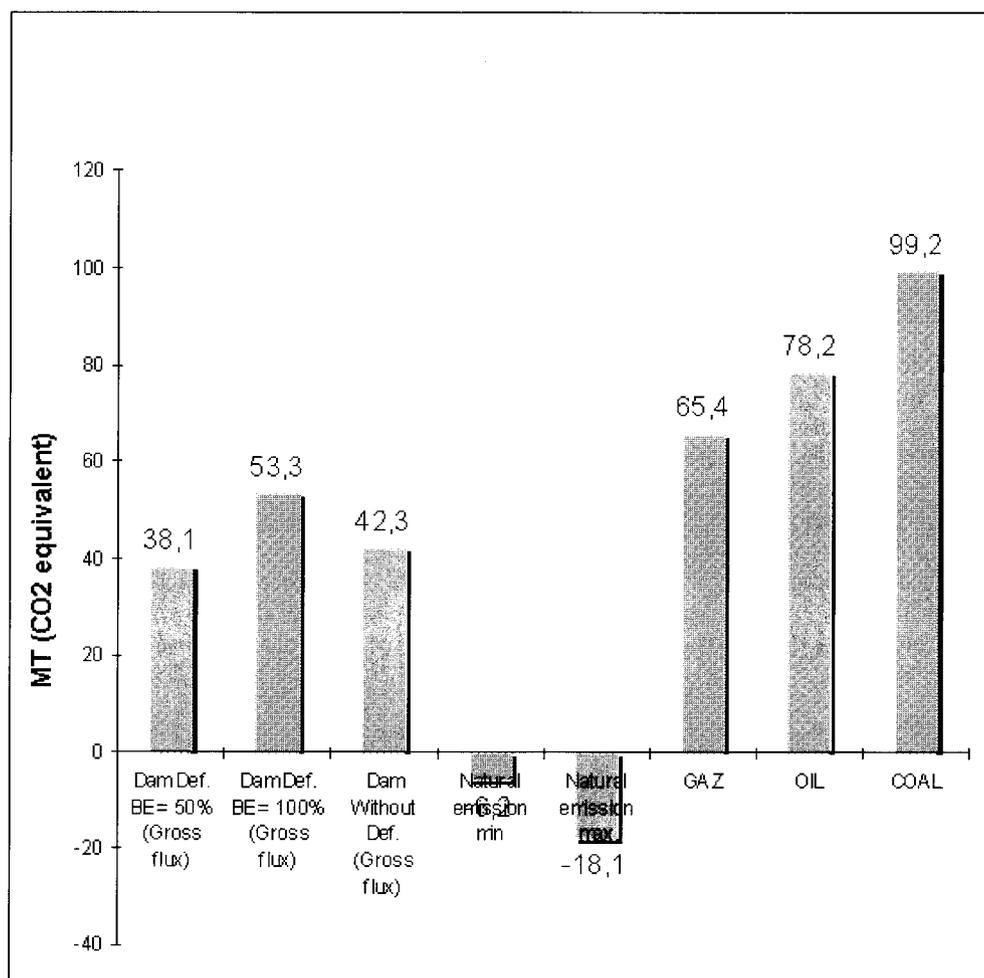


Fig. 4 : Estimation comparée des émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂), sur une période de 100 ans, entre le barrage et des centrales thermiques à gaz, charbon et pétrole. Pour le barrage on considère trois hypothèses : l'absence de déforestation de la retenue (qui est le cas réel), la déforestation avec combustion de 50% de la matière végétale, la déforestation avec combustion de 100 % de la matière végétale (car la combustion est émettrice de GES). Est aussi représentée sur cette figure une évaluation des émissions naturelles de GES (CH₄ et N₂O) par les sols avant la mise en eau. Le bilan net pour le barrage doit tenir compte de ces émissions (qui se soustraient) mais aussi du rapport entre puissance installée (base de ces calculs) et puissance réellement fournie (d'après Delmas R., 2002, Actes du Colloque de Sinnamary « L'avenir énergétique de l'outre-mer et des régions insulaires et le développement durable »).

Références bibliographiques

Delmas R., Servant J., Tathy J.P., Cros B. et Labat M., 1992, Sources and sinks of methane and carbon dioxide exchanges in mountain forest in equatorial Africa, *J. Geophys. Res.*, 97, 6179-6196.

Delmas R., Galy-Lacaux C. et Richard S., 2001, Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives, *Global Biochemical Cycles*, 15, 4, 993-1003.

Environnement Canada, 1992, Estimation des émissions de gaz provoquant l'effet de serre au Canada en 1990, *Rapp. SPE 5/AP/4*, Hull, Québec, Canada.

Galy-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. Thèse de l'Université de Toulouse, 210 p.

Galy-Lacaux C., Jambert C., Delmas R., Dumestre J.F., Labroue L., Cerdan P. et Richard S., 1996, Emission de méthane et consommation d'oxygène dans la retenue de Petit Saut en Guyane. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, 322, 11a, 1013-1019.

Galy-Lacaux C., Delmas R., Dumestre J.F. et Richard S., 1997, Evolution temporelle des émissions gazeuses et des profils de gaz dissous. Estimation du bilan de carbone de la retenue de Petit Saut deux ans après sa mise en eau, *Hydroécologie Appliquée*, 9, 1-2, 85-114.

Grégoire A. et Richard S., 2002, Impact of flooded biomass on the reservoir water quality during the first years of impounding, *Proceedings, Symposium- Planning and Sustainable Management of Large Reservoirs*, CIGB, Iguassu, Brazil.

Gosse P. et Grégoire A., 1997, Dispositif de réoxygénation artificielle du Sinnamary à l'aval du barrage de Petit Saut (Guyane), *Hydroécologie Appliquée*, 9, 1-2, 23-56.

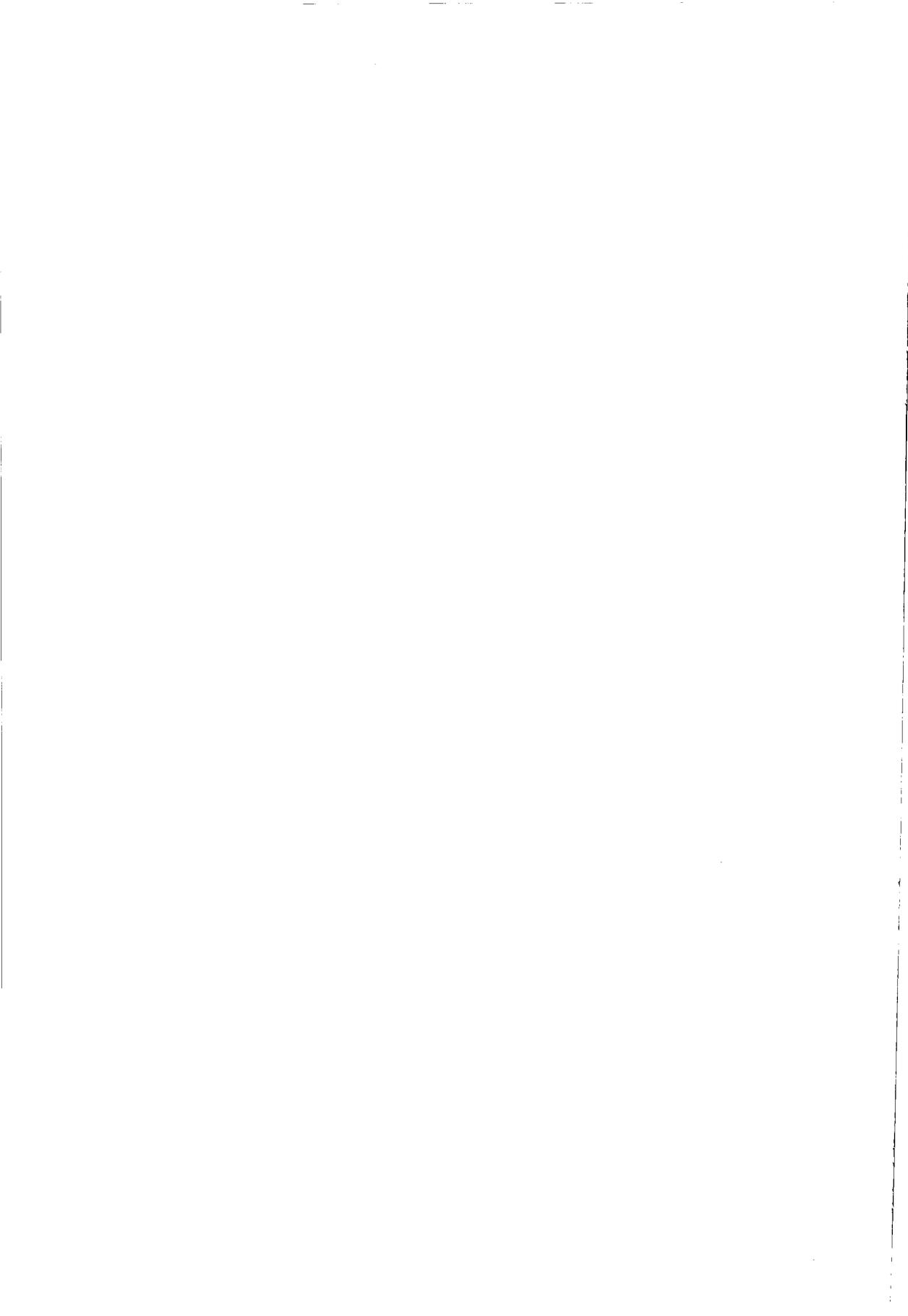
Keller M. et Stallard R.F., 1994, Methane Emission by bubbling from Gatun Lake Panama, *J. Geophys. Res.*, 99, 8307-8319.

Richard S., 1996, La mise en eau de la retenue hydroélectrique de Petit Saut (Guyane). Hydrochimie 1 - du fleuve Sinnamary avant la mise en eau 2 - de la retenue pendant la mise en eau 3 - du fleuve en aval. *Thèse de l'Université d'Aix-Marseille*, 278 p.

Richard S., Arnoux A. et Cerdan P., 1997, Evolution 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, *Hydroécologie Appliquée*, 9, 1-2, 57-84.

Richard S. et 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, *Rapport Scientifique Hydreco/EDF- CD Guyane*, 22p.

Vaquer A., Pons V. et Lautier J., 1997, Distribution spatio-temporelle du phytoplancton dans le réservoir de Petit Saut (Guyane française), *Hydroécologie Appliquée*, 9, 1-2, 169-194.



Réservoirs et émissions de gaz à effet de serre : conséquences pour l'hydroélectricité

Hydro lakes and greenhouse gas : consequences for hydroelectricity

Auteur :

M. Jean-Luc PIGEON, COYNE ET BELLIER
9 allée des Barbanniers, 92632 GENNEVILLIERS Cedex.
Téléphone : 33 1 41 85 03 18. Fax : 33 1 41 85 03 74.
E-mail : jean-luc.pigeon@coyne-et-bellier.fr

Résumé :

Dans le secteur de l'énergie, selon les recommandations du GIEC, il faut réduire les émissions de carbone dues à la combustion des fossiles. L'hydroélectricité est bien placée pour cela, en raison d'un faible facteur d'émission de carbone, et parce qu'elle dispose du potentiel pour une réduction significative des émissions. Des comparaisons ont néanmoins été effectuées entre les émissions brutes de gaz à effet de serre (GES) depuis les réservoirs hydroélectriques, et celles des centrales thermiques équivalentes. Cette communication discute de l'origine et du niveau des émissions mesurées, et des conclusions qui peuvent être tirées de ces comparaisons. En particulier, la mise en évidence d'émissions de GES depuis les réservoirs hydroélectriques, notamment en région tropicale, ne suffit pas à caractériser le bilan carbone du système. Trop d'incertitudes entrent en effet en jeu dans la comparaison entre une technologie à combustible fossile qui déstocke des ressources naturelles, et les réactions d'un écosystème aquatique ni clos, ni figé.

Abstract :

In the power generation sector, according to IPCC recommendations, carbon emissions due to combustion of fossil fuels must be reduced. Because it has a high potential for significantly helping towards a reduction in greenhouse gas emissions by the power sector, hydropower, with a low carbon emission factor, is well placed. Comparisons have nevertheless been made between gross methane and carbon dioxide emissions from operating reservoirs and emissions from equivalent fossil-fuelled power plants. This paper discusses the source and level of the emissions measured, and the conclusions that can legitimately be drawn regarding these comparisons. In particular, it can be stated that measurement of carbon emissions from hydro lakes, especially in tropical regions, is not sufficient to characterise the balance of the system. Many uncertainties and approximations are involved in the comparison between a fossil fuel technology, using natural stored resources, and the reactions of an aquatic ecosystem, which is neither closed nor static.

Mots-clés : gaz à effet de serre, réservoirs, hydroélectricité

Keywords: *greenhouse gas, emissions, reservoirs, hydroelectricity*

Introduction

Depuis les premières hypothèses suggérées en 1895 sur le rôle du gaz carbonique dans l'accroissement de la température de la Terre, les derniers travaux du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) publiés en 2001 (IPCC, 2001) sont maintenant beaucoup plus affirmatifs sur les évolutions climatiques : l'essentiel du réchauffement observé depuis cinquante ans est attribué aux activités humaines, et il est très improbable que l'ampleur des variations propres du climat puisse expliquer ce phénomène. Rappelons en quelques mots l'essentiel : lorsque le sol ré-émet vers l'espace des rayons infrarouges, certains gaz, les « gaz à effet de serre », les interceptent et les rabattent vers le sol, augmentant ainsi la température. Il s'agit d'un phénomène naturel...et salutaire : sans effet de serre, la température sur terre serait de moins dix-huit degrés. Il faut cependant noter que les concentrations de ces gaz sont très faibles : elle est de 0,035% en volume pour le plus abondant d'entre eux, le gaz carbonique (CO₂). C'est pourquoi les activités humaines peuvent influencer sur ces concentrations. De fait, depuis l'ère industrielle, les activités humaines ont entraîné une hausse significative des gaz à effet de serre dans l'atmosphère : cette hausse a été de 31% depuis 1750 pour le gaz carbonique, avec une concentration actuelle de 365 ppm, et de 150% pour le méthane (CH₄), avec une concentration actuelle de 1,7 ppm. Les autres principaux gaz à effet de serre (le protoxyde d'azote N₂O; les chloro-fluoro-carbone CFC, leurs substituts et certains gaz voisins ; ainsi que l'ozone) ont également vu leur concentration augmenter (IPCC, 2001). A l'aide d'outils de modélisation, les experts concluent maintenant que la température moyenne à la surface de la terre augmentera de 1,4 à 5,8°C à l'issue du siècle, avec notamment l'accentuation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, et un certain nombre de conséquences sur les activités humaines. De ce fait, les émissions de gaz à effet de serre deviennent un sujet majeur de préoccupation, avec en corollaire le développement des recherches scientifiques sur l'évolution du climat et sur la compréhension des grands cycles biogéochimiques. Les scénarios étudiés par le GIEC³² tentent d'imaginer à la fois les conséquences de ces évolutions sur les activités humaines, mais aussi les meilleurs moyens de stabiliser les émissions de gaz carbonique en agissant sur les politiques énergétiques d'une part, et sur la gestion des terres d'autre part.

La combustion des ressources fossiles constitue la première source de gaz à effet de serre

Les échanges naturels de carbone entre l'atmosphère et la biomasse terrestre s'effectuent par les processus naturels de photosynthèse, de respiration, de combustion et de décomposition. Par ses activités, principalement dans les secteurs de l'énergie et de l'utilisation des terres, l'homme modifie les conditions de ces échanges. Ainsi, la combustion de carburants fossiles et la production de

³² Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEP/IPCC) constitue la référence scientifique en la matière. Créé en 1988 conjointement par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), il établit à la demande des instances de la Convention Cadre des Nations-Unies pour les Changements Climatiques, des rapports et notes scientifiques pour l'application des articles du protocole de Kyoto.

ciment conduisent à émettre chaque année environ 6,3 Gt de carbone dans l'atmosphère ((GIEC, 2000). Ce flux, uniquement dû au facteur humain, s'accroît rapidement. Sur les vingt dernières années, la combustion de ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz) représente les trois quarts des émissions anthropiques de gaz carbonique, principal gaz à effet de serre, le reste de ces émissions étant principalement lié à la déforestation. Des quantités significatives de protoxyde d'azote (N₂O), de monoxyde de carbone, et autres polluants atmosphériques sont également émises par la combustion des ressources fossiles. Les autres phases du cycle d'exploitation, depuis l'extraction jusqu'à la distribution des combustibles conduisent aussi à l'émission de méthane, et ceci représente environ un cinquième du méthane dû aux activités humaines.

La moitié des émissions de CO₂ dues à la combustion des énergies fossiles s'accumule dans l'atmosphère.

Sur les deux dernières décennies, on sait maintenant que seule la moitié environ des émissions de CO₂ dues à la combustion des énergies fossiles s'est accumulée dans l'atmosphère (Bousquet P, 2000). Les puits³³ de carbone que représentent l'océan et la biosphère terrestre ont joué un rôle d'accumulation, l'un ou l'autre pouvant être prédominant, sans que l'on connaisse tous les mécanismes de cette capacité de stockage, et en particulier son évolution. Ainsi, l'accumulation de carbone par les écosystèmes terrestres n'est pas véritablement connue avec précision ; on parle de l'effet des modalités de l'utilisation des terres, de la régénération naturelle dans les latitudes moyennes et élevées, de la fertilisation des forêts par l'augmentation du CO₂ atmosphérique, du stockage dans les sols, ce dernier domaine étant paradoxalement très mal connu. On estime que l'absorption supplémentaire du dioxyde de carbone dans les écosystèmes forestiers se maintiendra plusieurs décennies au moins, mais que cette absorption diminuera graduellement (la capacité des écosystèmes à fixer des quantités supplémentaires de carbone serait limitée par les nutriments et d'autres facteurs biophysiques). En ce qui concerne l'océan, deux mécanismes sont à l'œuvre pour absorber le gaz carbonique atmosphérique qui se dissout dans les eaux de surface : la pompe de solubilité où le CO₂ réagit avec l'eau pour former des ions carbonates, et la pompe biologique, régie par l'activité de la biomasse marine. Le cycle du carbone dans l'océan fait actuellement l'objet d'études approfondies pour évaluer l'impact de l'accroissement des stocks de carbone : augmentation de la charge des eaux en CO₂, augmentation de l'acidité, dissolution des carbonates, transport et stockage du carbone dans les profondeurs de l'océan.

³³ Tout système ayant la capacité d'accumuler ou de libérer du carbone est un bassin de carbone (la biomasse forestière, les produits du bois, les sols, l'atmosphère,...). Ce terme est employé aussi comme synonyme de réservoir. Son contenu est exprimé en unité de masse. On entend par puits de carbone tout processus ou mécanisme qui absorbe un gaz à effet de serre ou un précurseur de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. Un bassin ou réservoir donné peut fonctionner en puits de carbone atmosphérique durant un certain laps de temps (quand il absorbe plus de carbone qu'il n'en libère). A l'inverse, un bassin ou réservoir peut être une source de carbone pour l'atmosphère s'il libère plus de carbone dans l'atmosphère qu'il n'en absorbe. Le stock ou la réserve de carbone est la quantité absolue de carbone que contient un bassin de carbone à un moment donné.

La réduction des émissions de carbone devient prioritaire dans le secteur de l'énergie et les énergies renouvelables sont bien placées pour cela

Face aux scénarios présentés par le GIEC, de nombreuses possibilités ont été évoquées dans les secteurs industriels, énergétiques ou agricoles en rapport avec l'objectif de réduction des émissions anthropiques de carbone. Ces possibilités sont essentiellement la réduction des émissions dues à la combustion des énergies fossiles, et l'augmentation des stocks de carbone continentaux (gestion des sols, reforestation). Dans le secteur de l'énergie, il a été admis comme techniquement possible de réaliser d'importantes réductions des émissions de carbone en se conformant à l'échéancier normal de renouvellement des installations existantes. Ainsi, au cours des 50 à 100 prochaines années, le système d'approvisionnement en énergie doit être remplacé en totalité au moins deux fois (GIEC, 1996), et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur, les issues possibles sont les suivantes :

- améliorer l'exploitation des combustibles fossiles : augmentation du rendement, utilisation de combustibles fossiles à faible teneur en carbone (par exemple, remplacement du charbon par le gaz naturel) ; voire stockage et piégeage du carbone contenu dans les effluents gazeux des centrales ;
- utiliser l'énergie nucléaire ;
- utiliser les énergies renouvelables : hydroélectricité, biomasse, énergie éolienne, énergie solaire, géothermie et énergie des marées.

Ces alternatives représentent des potentiels importants de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais d'autres considérations économiques et sociales interviennent bien sûr dans leur mise en œuvre : coûts, disponibilité des technologies, acceptabilité du public, impacts sur l'environnement, facteurs institutionnels. On ne parlera pas ici de l'énergie nucléaire, ni des mesures de piégeage du CO₂ depuis les centrales thermiques, mais plutôt des conséquences des objectifs de réduction des émissions de carbone pour l'énergie hydroélectrique.

Les énergies renouvelables, parce qu'elles permettent d'éviter les émissions de gaz à effet de serre issues des combustibles fossiles, sont considérées par le GIEC comme des techniques d'atténuation des incidences de la production d'énergie sur le changement climatique (GIEC, 1996) : pas d'utilisation de combustibles fossiles, élimination des émissions correspondantes de carbone dans l'atmosphère. Cet aspect doit cependant être nuancé en fonction des analyses du cycle de vie de ces technologies, qui conduisent aussi à des émissions indirectes de carbone. Les émissions de carbone évitées par le recours aux énergies renouvelables dépendent également du type de combustible remplacé : elles seront plus importantes dans le cas du charbon que dans le cas du gaz naturel. De manière générale, la contribution des énergies renouvelables sera amenée à s'accroître dans le futur, selon les projections effectuées par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA, 2000), et sous l'impact des politiques publiques déjà entreprises en leur faveur dans la plupart des pays de l'OCDE. Parmi les énergies renouvelables, l'hydroélectricité dispose d'un potentiel suffisant pour contribuer significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur énergétique, ce qui constitue un autre atout. Actuellement la seconde source de production d'électricité dans le monde, avec une part de marché de

18%, l'énergie hydraulique devrait fournir 340 GW supplémentaires à l'horizon 2020, principalement dans les pays émergents où le potentiel de développement demeure important (IEA, 2000). Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, ce point a son intérêt si on considère que les pays émergents contribueront de plus en plus aux émissions de carbone dans les prochaines décennies, avec le développement de leurs besoins énergétiques. Si on considère le rôle historique de l'énergie hydraulique dans le développement des industries électriques des pays industrialisés - en 1960, l'hydraulique représentait 82% de la production d'électricité en Italie, 51% au Japon et 18% aux Etats-Unis⁸ - on peut effectivement penser que le potentiel de développement est important et qu'il pourra contribuer à réduire les émissions de carbone dues à la combustion des énergies fossiles.

La situation particulière de l'hydroélectricité vis à vis de l'émission de gaz à effet de serre

Dans le cadre des comparaisons des émissions de gaz à effet de serre entre les différentes options de production d'électricité, des mesures ont été effectuées ces dernières années depuis les réservoirs de sites hydroélectriques, notamment au Canada, en Finlande et au Brésil. Ces mesures ont montré que, comme tout lac ou zone naturelle humide, les réservoirs émettaient du méthane et du gaz carbonique dans l'atmosphère. La Commission Mondiale des Barrages s'est penchée sur ce sujet et a compilé des analyses et des données dans le cadre de la revue thématique correspondante (WCD, 1999). Sur cette base, le rapport de la Commission (WCD, 2000) rappelle que « tous les grands barrages et les lacs naturels dans les régions boréales et tropicales qui ont fait l'objet de mesures émettent des gaz à effet de serre ». Les recherches expérimentales indiquent notamment que les réservoirs peuvent émettre du méthane³⁴ en raison de la décomposition de la matière organique en condition anaérobie. Ceci se produit notamment en région tropicale dans la couche profonde anoxique lorsque les eaux du réservoir ou du lac sont stratifiées. Lorsque les eaux sont suffisamment oxygénées, la décomposition de la biomasse génère du CO₂, et non du méthane. En fait, deux phénomènes ont été observés :

- Une production de méthane et de gaz carbonique suite à la mise en eau du réservoir, production qui décroît avec le temps et qui semble correspondre avec la décomposition de la biomasse immergée (Galy-Lacaux C et al. 1997/ Matvienko B. et al., 2000). Dans ce phénomène toutefois, d'autres facteurs sont également à prendre en considération, comme les apports en carbone du bassin versant et l'activité biologique du réservoir, sans que l'on sache pour l'instant définir les prépondérances (Weissenberger S et al., 1998) ;
- Une production constante de CO₂, indépendante de l'âge du réservoir, qui semblerait liée à des émissions permanentes provenant du réservoir, des sols, et du bassin versant, et qui est très proche des émissions constatées sur les lacs naturels. Selon les données collectées par Hydro-Quebec en 2000, sur 8 réservoirs âgés de 20 à 80 ans et 18 lacs de référence (WCD, 2000), il n'y a quasiment pas de différence entre la quantité de gaz à effet de serre dissous

³⁴ Le méthane est un gaz à effet de serre disposant d'un pouvoir de réchauffement vingt fois plus important que le CO₂, mais aussi d'une durée de vie beaucoup plus courte.

observée dans un réservoir artificiel et les lacs naturels de référence situés à proximité.

Ce phénomène d'émission de méthane depuis les réservoirs n'est pas nouveau en soi, si on considère que les zones humides naturelles constituent d'importantes sources de méthane à l'échelle de la planète, à côté des autres émissions naturelles de méthane qui comprennent également les termites et le bétail. Ces sources naturelles qui agissaient auparavant comme seul régulateur de la teneur en méthane de l'atmosphère, sont maintenant minoritaires par rapport aux sources anthropiques. Celles-ci ont été recensées par le GIEC et comprennent : le bétail, les rizières, la combustion de la biomasse, les décharges, l'extraction du gaz et du charbon et les activités de l'industrie pétrolière en général (IPCC, 2000). Elles sont parties prenantes dans le calcul des émissions de carbone qui contribuent à l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre. Il est d'ailleurs à noter que le GIEC n'a pas créé de catégorie particulière pour les émissions depuis les réservoirs hydroélectriques ou les autres lacs artificiels : elles sont considérées comme une source mineure d'émission de méthane par rapport aux autres secteurs de l'énergie et par rapport aux activités agricoles.

Les performances de l'hydroélectricité vis à vis des centrales thermiques équivalentes

La littérature rapporte que de toutes les options de production d'électricité, les technologies à combustible fossile ont les facteurs d'émission de gaz à effet de serre (exprimés en masse équivalente de carbone par unité d'énergie produite) les plus élevés, le charbon ayant environ un facteur d'émission deux fois plus important que le gaz naturel (IEA, 1998/Sparado VJ et al., 1998). Parmi les énergies renouvelables, l'hydroélectricité au fil de l'eau (sans réservoir) et l'énergie éolienne disposent des facteurs d'émission les plus bas (en considérant les émissions générées par la construction de ces équipements, car ces technologies ne provoquent aucune émission lors de leur exploitation). Entre ces extrêmes, le rapport est de 50 à 100 fois plus faible en faveur des énergies renouvelables. L'énergie solaire (photovoltaïque), la biomasse se situent dans la fourchette basse, selon les gammes de valeur identifiées dans la littérature, de même que l'hydroélectricité avec réservoir. Pour autant, le cas particulier de la comparaison entre les émissions de carbone provoquées par la création d'un réservoir hydroélectrique et les émissions de carbone (CO₂) générées par une centrale thermique de capacité équivalente est loin d'être évident, au regard des aspects suivants :

- Les émissions de carbone d'une centrale thermique sont constantes dans le temps et relativement simples à mesurer et à calculer, car elles proviennent d'une source unique. Celles des réservoirs hydroélectriques sont dispersées géographiquement sur l'étendue du réservoir et variables dans le temps : elles sont particulièrement notables dans les premières années, le temps de la décomposition de la biomasse. Après la phase d'intense décomposition, une émission de carbone survient de la biomasse résiduelle, et de la décomposition de la nouvelle biomasse produite dans le réservoir. Pour autant, une part de ces émissions aurait été produite de toute façon, du fait de la décomposition des sols qui ont été submergés par le réservoir ;

- Le réservoir ne forme pas un écosystème clos ni inerte : il reçoit du carbone depuis le bassin versant et en exporte par l'intermédiaire des turbines et de l'évacuateur de crues ; il est en relation étroite avec d'autres composantes du système telles que les nappes souterraines, la rivière, la végétation ; il développe sa propre chaîne biologique et stocke des sédiments. Par ailleurs, ses caractéristiques physiques ne sont pas constantes : la surface immergée varie selon les caractéristiques de l'exploitation, ce qui contribue à modifier la nature et le volume des émissions ;
- Plus les échelles de temps utilisées dans la comparaison sont longues, plus la comparaison est favorable à l'hydroélectricité. Ceci est une conséquence directe de la répartition différente dans le temps des émissions de carbone entre les deux technologies, et de la durée de vie beaucoup plus importante du CO₂ comparée à celle du CH₄.

En comparant néanmoins les émissions brutes de gaz à effet de serre mesurées sur les réservoirs, c'est à dire sans identifier ce dont le réservoir est réellement responsable, on observe que ces émissions sont en général considérablement plus faibles que celles des centrales thermiques équivalentes (IEA, 1998). C'est notamment le cas dans les zones boréales (WCD, 2000). Ceci revient en fait à comparer les émissions de carbone des centrales thermiques à celles de lacs naturels, car ces derniers ont des niveaux d'émissions similaires à ce qui est observé sur des réservoirs hydroélectriques au Canada et en Finlande (Kortelainen, 1998/ Gagnon L, 2002). Les régions tropicales, et notamment les grands barrages de l'Amazonie, font l'objet de controverses sérieuses et de résultats tellement contradictoires parmi la communauté scientifique (WCD, 1999) qu'il est très difficile de se faire une opinion. Les caractéristiques des réservoirs qui ont fait l'objet d'études et de comparaisons (Balbina et Tucuruí, au Brésil, avec des réservoirs respectifs d'environ 2400 et 2800 km² et des puissances de 250 et 4000 MW) ne sont par ailleurs certainement pas représentatives du « barrage moyen ». Les conclusions des investigations menées sur ces réservoirs sont moins favorables à l'hydroélectricité sur le plan des émissions thermiques évitées, notamment pour les sites où le ratio énergie produite/superficie du réservoir est faible (0,10 W/m²). Quand on considère les sites de ratio supérieur, les conclusions restent favorables à l'hydroélectricité. Ces résultats ne tiennent cependant pas compte des émissions nettes de l'écosystème, c'est à dire qu'ils ne reflètent pas la part des émissions dont le réservoir est responsable. En effet, les émissions du site avant inondation³⁵, ainsi que les apports et les émissions « naturelles » du bassin versant en situation « avant barrage » ne sont pas déduits des quantités mesurées.

La mise en évidence des émissions depuis les réservoirs ne suffit pas à caractériser le bilan carbone du système

Pour établir des comparaisons avec les centrales à combustible fossile, la plupart des recherches qui ont été menées jusqu'à présent ont finalement consisté à mesurer les gaz à effet de serre à certains endroits du réservoir, puis à traduire les valeurs obtenues en tonnes équivalent carbone émises dans l'atmosphère pour les besoins de la comparaison. Or, comme les scientifiques le reconnaissent

³⁵ et il est utile de savoir à ce propos que les émissions de gaz à effet de serre depuis les plaines d'inondation amazoniennes peuvent être considérables

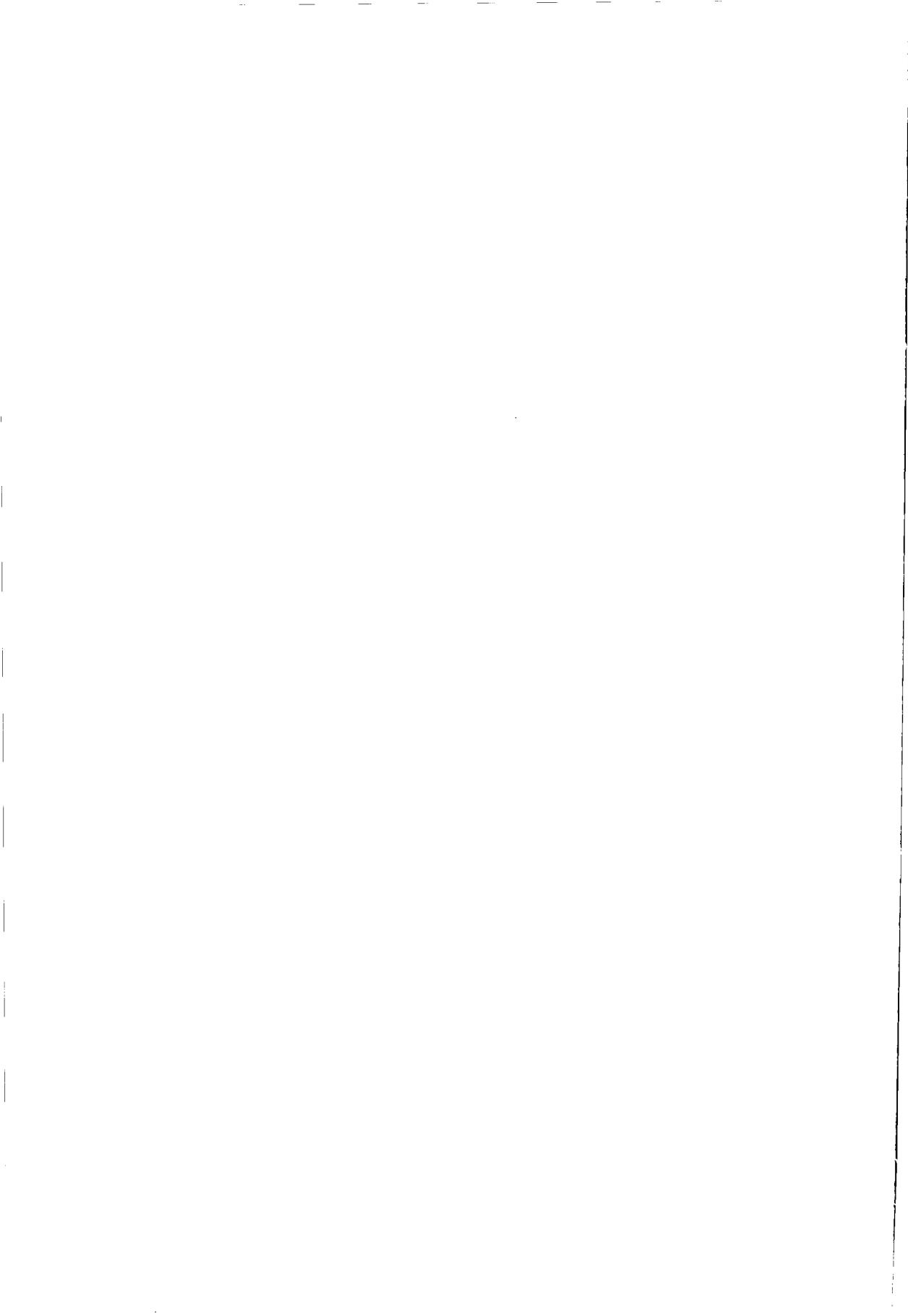
volontiers, ce protocole est bien loin de représenter les réactions de l'écosystème qui a été affecté. Que sait-on véritablement aujourd'hui du cycle du carbone dans les systèmes aquatiques, au niveau des bassins versants, ou dans les sols ? Quelle est, parmi les émissions brutes mesurées depuis les réservoirs, la part des émissions de carbone attribuée aux apports du bassin versant et qui aurait donc été décomposée de toutes façons ? Quelle est l'influence de la sédimentation au fond du réservoir, de l'accroissement de la biomasse et de la photosynthèse qui se produit dans le réservoir ? Pour ce qui concerne les sols, par exemple, il serait nécessaire d'attribuer des facteurs d'émissions spécifiques pour chaque zone du réservoir et de déterminer comment ce bassin de carbone se comportait avant son inondation (source/puits).

Conclusion

S'il est admis que les émissions brutes de GES mesurées sur les réservoirs des régions tempérée et boréale sont considérablement plus faibles que celles de centrales thermiques équivalentes, des incertitudes subsistent dans le cas des réservoirs tropicaux. Les expérimentations conduites ces dernières années participent à la compréhension des phénomènes d'émissions de gaz à effet de serre, mais elles sont insuffisantes pour conclure sur le bilan carbone qui résulte de la création d'un réservoir hydroélectrique en région tropicale. Aujourd'hui, il faut admettre que les mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui interviennent dans la transformation, le stockage et la dégradation du carbone au sein d'un réservoir restent malgré tout peu connus. De ce fait, dans la littérature, les tentatives de comparaison des émissions émises lors de la création d'un réservoir avec celles qui sont générées par une centrale thermique équivalente sont peu probantes dans leur principe et contradictoires dans leurs résultats dans le cas des réservoirs tropicaux. S'il s'agit d'estimer la transformation locale du cycle du carbone dans le réservoir, toutes les composantes de l'écosystème doivent être prises en considération et pas seulement les émissions brutes mesurées sur le réservoir. Si l'on admet la validité d'une comparaison entre le déstockage de ressources fossiles accumulées depuis des millions d'années (centrale thermique) et la transformation du cycle local du carbone au niveau d'un bassin versant (création d'un réservoir), l'établissement d'un bilan de carbone doit être entrepris en calculant les émissions nettes qui résultent de l'établissement du réservoir.

Liste des références

- Bousquet P, Peylin P, Ciais P, Le Quéré C, Friedlingstein P, Tans P., 2000. « regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 » ; Science, Vol 290, pages 1342-1346 ;
- Gagnon Luc, 2002. « IRN Statement on emissions from hydro reservoirs: a case of misleading science » , Hydropower and Dams, issue four, 2002;
- Galy-Lacaux C, Delmas R, Jambert C, Dumestre JF, Labroue L, Richard S, Gosse P ; decembre 1997. « Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams : a case study in french guyana » ; Global Biogeochemical Cycles, vol.11, n°4, pages 471-483 ;
- GIEC, 1996. Techniques, politiques et mesures d'atténuation du changement climatique, p 5-6. (from IPCC, 1996 : Climate Change 1995 : Impacts, adaptation and mitigation of climate change : scientific-technical analysis, summary for policymakers, 4.3) ;
- GIEC, 2000. Rapport spécial, utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie ; résumé à l'attention des décideurs, pages 3 à 5 ;
- IEA, 1998. Benign energy ? the environmental implications of renewables ; appendixes A and F ;
- IEA, 2000. World energy outlook, highlight edition ; p 49-54 ; p 10 ; p 84 ;
- IPCC special report on Land Use, Land-use Change and Forestry, chapter 1.2.2, 2000 ;
- IPCC, 2001. Third assessment report of working group I, summary for policymakers, p 7, January 2001 ;
- Kortelainen, 1998. « Finnish lakes as a source of greenhouse gases : CH₄, CO₂ and N₂O supersaturation in 12 finnish lakes before and after ice-melt » ; Proceedings of international workshop on hydro dams, lakes and greenhouse emissions, Rio de Janeiro ; p 41-49 ;
- Matvienko B., Sikar E., Pinguelli Rosa L., dos Santos M.A, de Filippo R.and Cimbliserl A.C.P; decembre 2000. « Gas release from a reservoir in the filling stage » ; Verh. Internat. Verein. Limnol., 27 ; 1-5 ;
- Rosa L.P, Sikar B., Dos Santos M.A, Dos Santos E.O, Sikar E.M, 2002. « Dam reservoir and greenhouse gas emissions in Brazil », ICOLD, symposium on reservoir management in tropical and sub-tropical regions, september 2002 ;
- Sparado V.J, Langlois L., Hamilton B., 2000. « Greenhouse gaz emissions of electricity generation chains : assessing the difference » ; IAEA Bulletin, 42/2/2000 ;
- WCD secretariat, 1999. Dams and Global Change ; thematic review paper II.2 prepared as an input to the World Commission of dams, Cape Town ; certainty and uncertainty in the science of greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs ; p 12 ; p 19 ; annex 7 ;
- WCD, 2000. Dams and development, chapter 3, ecosystems and large dams : greenhouse gas emissions ; p 75 - 76 ;
- Weissenberger S, Duchemin E, Houel S, Canuel R, Lucotte M, 1998. « Greenhouse gas emissions and carbon cycle in boreal reservoirs » ; proceedings of international workshop on hydro dams, lakes and greenhouse gas emissions, Rio de Janeiro ; p 33-40 ;



Le changement climatique affectera-t-il nos hydrosystèmes ?

Le cas des bassins du Rhône et de la Seine

*Should the global change affect our hydrosystems?
Case of Rhone and Seine watersheds*

Jean-Michel Tanguy

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations
42, avenue Gaspard Coriolis, 31 057 Toulouse Cedex 1
Tél : 05 34 63 85 51
Fax : 05 34 63 85 78
E.mail : jean-michel.tanguy@environnement.gouv.fr

Maurice Müller

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
Direction des études économiques et de l'évaluation environnementale
20, avenue de Ségur
Tél : 01 42 19 17 52
Fax : 01 42 19 17 85
E.mail : maurice.muller@environnement.gouv.fr

Résumé

Le changement climatique est devenu un enjeu important pour l'élaboration des politiques publiques à partir du moment où les premiers scénarios alarmistes du GIEC ont mis en évidence une augmentation de plusieurs degrés de la température de l'air, une remontée du niveau de la mer et des évolutions importantes du climat. Sur la base des travaux du GIEC, un programme national, lancé par le ministère chargé de l'environnement, a mis en évidence des conséquences spécifiques telles qu'une fonte nivale précoce, une augmentation des pics de crues, des étiages beaucoup plus prononcés. On comprend alors que les pouvoirs publics commencent à se soucier de près de ces évolutions...

Abstract

Global Change began a main goal for public policies when the first simulations of the GIEC group pointed out an increase of air temperature, a sea level rise and drastic climate evolutions. Based on the GIEC results, a national program of the ministry of environment, focussed on the consequences on the hydrology of the main French watersheds puts on evidence specific evolutions: early snow melting, increased flood peaks, more pronounced lowest water levels. It is also obvious that the public institutions begin to be preoccupied by these evolutions...

Mots-clés : changement climatique, GIEC, GICC, hydrologie, bassins du Rhône, bassin de la Seine

Keywords : *global change, GIEC, GICC, hydrology, Rhône watershed, Seine watershed*

INTRODUCTION

Le changement climatique est devenu un enjeu important depuis une vingtaine d'années pour plusieurs raisons. La première vient du fait que les pays industrialisés se préoccupent de plus en plus de qualité de vie, ce qui a diminué le seuil de tolérance aux calamités naturelles. Par ailleurs, les progrès scientifiques et techniques permettent de mesurer divers paramètres physiques qui mettent en évidence des évolutions à court et moyen terme. Enfin, les premières études lancées il y a une vingtaine d'années étaient vraiment alarmistes. Elles ont produit une forte médiatisation du domaine.

Le premier groupe d'experts internationaux sur l'évolution du climat (GIEC) établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) a posé les premiers fondements scientifiques de cette nouvelle discipline. Le GIEC a montré que les gaz à effet de serre, principalement le gaz carbonique, issu de la combustion du charbon et du pétrole étaient les acteurs du réchauffement constaté sur la planète. Ce fut la première démonstration de l'effet du comportement humain sur notre écosystème. Cette augmentation de la température de l'air provoquerait des conséquences pouvant se traduire par une pression sur nos ressources vivantes, sur terre comme sur mer, telle que la remontée du niveau de la mer et la modification sensible du climat.

Cette présentation reprend les principales conclusions du GIEC ainsi que celles des équipes de recherches qui travaillent depuis 1999 dans le cadre des projets GICC sur les conséquences du changement climatique sur l'hydrologie des bassins du Rhône et de la Seine.

1. MESURES ET CONSTATS

Au XX^e siècle, la température moyenne globale à la surface de la Terre s'est accrue de 0,6°C. Les années 1990 ont été la décennie la plus chaude, avec un pic en 1998. Des ballons-sondes sont lancés depuis un certain nombre d'années. Ils permettent de constater que les températures ont augmenté ces quarante dernières années dans les huit kilomètres des couches inférieures de l'atmosphère.

Les mesures en Antarctique et ailleurs font apparaître une réduction de la couverture neigeuse et des étendues glaciaires. La couverture neigeuse a diminué de 10 % depuis la fin des années 1960. Les glaciers reculent, pas simplement en épaisseur mais aussi en surface. La surface de la glace en mer a diminué de 15 %. Des limnigraphes et des marégraphes, par exemple à Marseille et à Brest — premier site instrumenté français — ont mesuré une élévation du niveau moyen global des mers de 0,1 m à 0,2 m au cours du XX^e siècle. Par ailleurs, les précipitations se sont accrues de 0,5 % à 1 % tous les 10 ans dans l'hémisphère Nord. On constate aussi un changement dans la fréquence — et pas seulement dans l'intensité — des événements et des précipitations importantes qui a augmenté de 2 % à 4 %. Enfin, les épisodes de réchauffement du phénomène El Nino ont été plus fréquents, plus persistants et plus intenses depuis le milieu des années 1970. L'intensité des sécheresses en Asie et en Afrique a augmenté également.

À côté de ces événements globaux mesurés, des constats ont été également faits sur les phénomènes anthropiques. Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et leur forçage radiatif ont continué d'augmenter à cause des activités humaines. Les concentrations de CO₂ mesurées par les prélèvements dans les calottes glaciaires se sont accrues de 31% depuis 1750. Les trois quarts des émissions anthropiques de CO₂ au cours de 20 dernières années sont dues à la combustion de combustibles fossiles. Il en est de même pour le méthane, le CH₄, l'oxyde nitreux N₂O : terres cultivées, aliments pour bétail, émanation des décharges, industrie chimique... La couche d'ozone stratosphérique qui produit un forçage radiatif négatif s'appauvrit. L'ozone troposphérique, quant à elle, a diminué. Et les aérosols produisent un forçage positif. Enfin, NO_x, CO et COV, gaz à effet de serre indirects, augmentent également.

Les forçages radiatifs sont de l'énergie soit positive, soit négative qui produit soit un réchauffement, soit un refroidissement. Tous ces gaz lâchés dans l'atmosphère produisent un bilan d'énergie positif, c'est-à-dire un réchauffement, alors que l'ozone stratosphérique qui est beaucoup plus haute, produit un refroidissement. Globalement, on s'aperçoit qu'il y a un pic important de l'effet de ces gaz qui sont rejetés dans l'atmosphère de par l'activité de l'homme, et produisent un fort réchauffement. Mais il y a aussi les effets indirects des aérosols qui, bien que très faibles, ont des conséquences de refroidissement.

Sur la base de ces constats et compte tenu de la complexité des interactions entre tous ces processus, il est apparu nécessaire d'appréhender les évolutions naturelles et anthropiques par le biais de la modélisation.

2. RECOURS A LA MODELISATION

Les modèles climatiques généraux (MCG) permettent de déterminer quelles peuvent être ces évolutions. Le meilleur moyen est d'essayer de reproduire la situation mesurée, avec les connaissances disponibles et les mesures collectées dans le passé, puis d'extrapoler les tendances en fonction de scénarios correspondant à des scénarios de croissances économiques différentes. Plus d'une centaine d'experts ont participé à ces études. Ils ont défini quatre grandes familles de scénarios possibles, suivant la croissance économique envisageable (ils sont tous consultables dans le rapport du GIEC) :

A1 : croissance économique très rapide, population mondiale maximale, usages intensifs de combustibles. Cette situation entraîne le plus de pollutions ;

A2 : monde très hétérogène avec autosuffisance et préservation des identités locales. Ce modèle prévoit une moindre mondialisation, des progrès économiques plus lents ;

B1 : forte augmentation de la population, plus de services mais aussi plus de technologies propres ;

B2 : population mondiale en augmentation régulière, développement économique intermédiaire, protection de l'environnement, approche locale. C'est un scénario moyen.

Ces scénarios sont injectés à l'intérieur de modèles de simulation que reproduisent la physique des processus sur l'ensemble du globe en prenant en compte les échanges océan-atmosphère.

Par exemple, on a isolé la courbe concernant le forçage naturel de celle concernant le forçage anthropique, entre 1860 et 2000 (figure 1). Si on garde uniquement le forçage naturel, on s'aperçoit qu'il y a une certaine stabilisation, même jusqu'en l'an 2000.

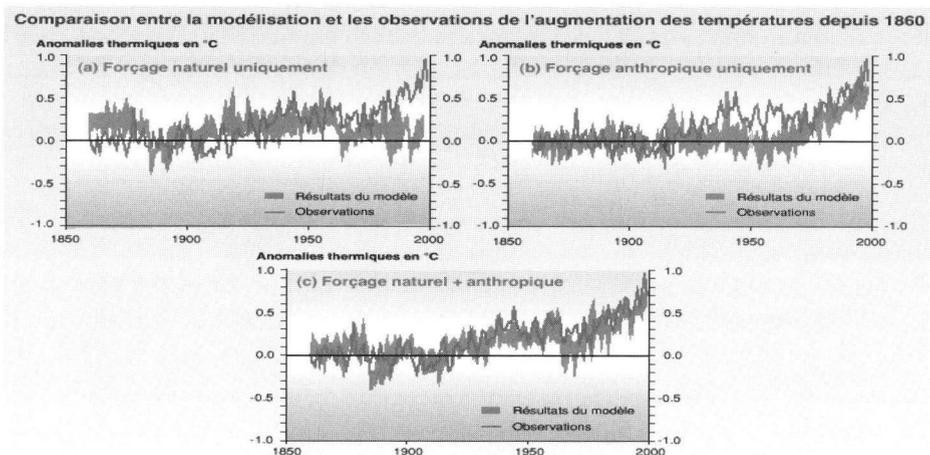


Figure 1 : reproduction et évolution de la température de l'air (source GIEC)

En revanche, si on ne conserve que le forçage anthropique, on perçoit une forte augmentation des températures qui est quasiment celle que l'on observe. Quand on ajoute les deux effets, après les avoir dissociés au préalable, ils correspondent à la situation existante.

2.1. Evolution de la température de l'air et du niveau de la mer

Les simulations correspondent aux scénarios d'évolution. Elles conduisent à des évaluations assez différentes de l'évolution des températures qui se situe entre 1,5°C et 6°C.

De manière similaire, les simulations prévoient une élévation du niveau de la mer compris entre 9 cm et 88 cm d'ici 2020, ce qui est considérable. Cela vient de plusieurs phénomènes très reliés : la perte de masse des glaciers, la dilatation thermique des océans avec l'augmentation des températures... Sur nos côtes, les répercussions risquent d'être importantes.

2.2. Evolution des précipitations

Les projections prévoient que l'influence des activités humaines contribuera à modifier la composition atmosphérique tout au long du XXI^e siècle. On sait qu'une interaction directe s'effectue à partir des gaz à effet de serre, comme le CO₂, le N₂O ou le CH₄ dont la concentration va augmenter. Les événements de précipitations plus intenses devraient augmenter. Mais les modèles ne concordent pas toujours quant à l'évolution future de l'intensité, de la fréquence et de la variabilité des tempêtes aux latitudes moyennes.

Ces modèles numériques rencontrent des difficultés pour appréhender spatialement et temporellement l'évolution de ces tempêtes qui sont générées sur les océans.

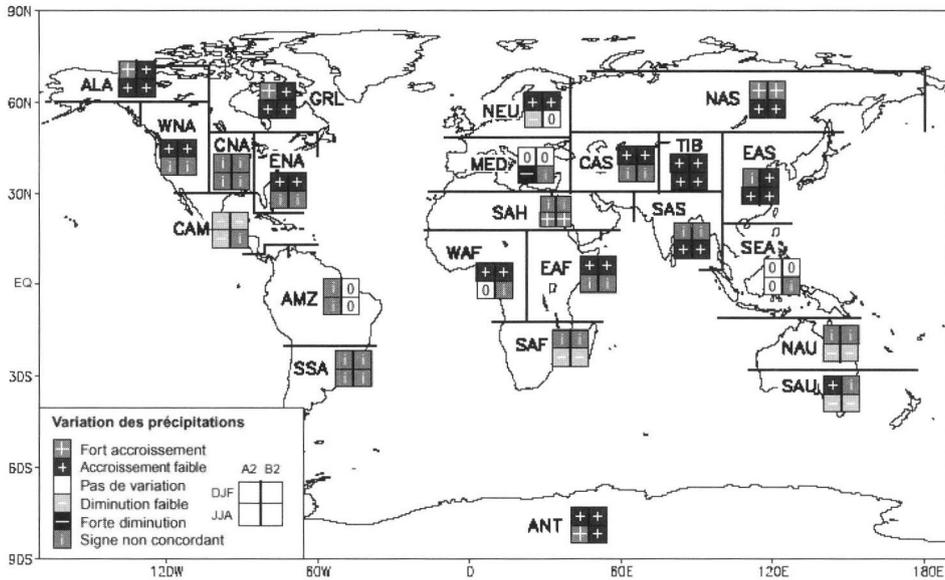


Figure 2 : variations des précipitations

Dans l'hémisphère Nord, la superficie de la couverture neigeuse et de la glace de mer devrait diminuer.

Les prévisions concernant les variations des précipitations (figure 2) donnent une situation assez favorable en Europe, proche de zéro. Mais on arrive à montrer que le régime hydrologique va évoluer.

3. EVOLUTION DE L'HYDROLOGIE DES GRANDS BASSINS

Quel que soit le modèle utilisé, les résultats obtenus montrent que les cycles hydrologiques seront plus intenses sur un grand nombre de régions. Des incertitudes demeurent sur la capacité des modèles aux échelles régionales (sur les précipitations, notamment). Ils donnent lieu à des projections contradictoires aux échelles locales et régionales.

L'Europe devrait assister à une diminution des débits annuels moyens de ses principaux cours d'eau ainsi qu'à la réalimentation des nappes, avec une augmentation du stress hydrique. Il est probable qu'en été, l'écoulement, les ressources en eau et l'humidité des sols diminueront en Europe méridionale, contribuant ainsi à creuser l'écart entre l'Europe du Nord et celle du Sud, sujette à la sécheresse. Il est également probable que ces mêmes facteurs augmenteront en hiver aussi bien dans le Nord que dans le Sud. Ce qui est un peu plus catastrophique est que la moitié des glaciers alpins pourraient disparaître d'ici la fin du XXI^e siècle. On voit déjà que les moraines ont tendance à fondre.

Pour être en mesure de préciser les conséquences du changement climatique sur l'hydrologie des grands bassins hydrographiques français, le ministère de l'Écologie et du Développement durable a lancé les programmes de recherche GICC Rhône et GICC Seine. Ces programmes ont démarré il y a quelques années et ont déjà fourni quelques conclusions qui sont reprises et détaillées sur les sites indiqués en fin d'article.

Ces études reposent sur plusieurs scénarios correspondant à un doublement de CO₂ jusqu'à 2050. Ce scénario, assez pénalisant, quoique vraisemblable, conduit à une augmentation des températures de 2°C l'hiver et de 4°C l'été, un accroissement des précipitations hivernales de 15 %, et une diminution des précipitations estivales de 20 %.

3.1. Bassin du Rhône

Le projet GICC Rhône a débuté en 1999. Six configurations issues de 4 Modèles de Changement Climatique (MCG) ont été considérés (LMD de l'IPSL, ARPEGE de Météo-France, HC du Hadley Center et UR de l'Université de Reading). Ces configurations correspondent à des simulations avec doublement de CO₂ sous hypothèse de 1% de croissance annuelle. Pour chaque configuration, les champs de température de la mer ont été établis à partir de simulations préalables du même modèle couplé océan-atmosphère (celui du Hadley Center). Les 6 configurations sont réparties en 4 configurations " basse résolution " (2 ou 3 points du MSG uniquement sur le bassin) et 2 configurations " haute résolution " (entre 10 et 28 points sur le bassin).

Généralement, les MCG ont une très bonne capacité à simuler le cycle mensuel de la température de l'air, mais ont des difficultés à représenter les précipitations moyennes mensuelles avec des écarts mensuels pouvant être importants.

A partir des résultats de ces MSG, le couplage d'un modèle calculant l'évapotranspiration : ISBA et d'un modèle d'évaluation des débits : MODCOU permet de mettre en évidence une augmentation des pluies hivernales, une diminution des précipitations hivernales et une augmentation de la température de l'air. Chaque effet met en route divers processus intimement reliés :

- L'augmentation des pluies hivernales plus fortes que l'augmentation de l'ETP augmente le contenu en eau du sol, donc du ruissellement de surface et le drainage. En zone montagneuse, l'augmentation simultanée de la température de l'air s'accompagne d'une diminution des précipitations neigeuses et par conséquent d'une réduction des accumulations hivernales.
- La diminution des précipitations estivales accroît le déficit hydrique du sol qui est renforcé par l'augmentation de l'ETP (augmentation de la température de l'air), ce qui entraîne une désaturation des sols beaucoup plus précoce et des étiages plus sévères en automne.
- L'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de l'évaporation réelle pendant l'hiver et le printemps car les sols sont bien alimentés en eau. En revanche, l'évaporation réelle a tendance à être réduite en été et en automne par effet de stress hydrique. Le flux de chaleur sensible vers l'atmosphère est alors renforcé.

Les surfaces enneigées diminuent en moyenne de 25% à 40% suivant les configurations. Le manteau neigeux pour les altitudes élevées est un peu moins affecté car la température moyenne y est largement inférieure au point de fusion.

Sous-bassin de la Haute-Durance

Cette partie du haut bassin est dépourvue de barrages, ce qui permet de relier directement la dynamique du manteau neigeux au régime hydrologique. Pour les conditions actuelles, la modélisation est capable de reproduire remarquablement

les débits mensuels. Les scénarios montrent une réduction de l'équivalent eau de 50% et une fonte beaucoup plus précoce d'environ un mois.

La fonte nivale précoce induit un pic de crue au mois de mai en avance d'environ un mois par rapport à la situation actuelle (figure 3). Il s'en suit des étiages beaucoup plus prononcés en juillet et en août. En automne et en hiver, on peut noter une augmentation significative des débits dus à la plus grande proportion de précipitations liquides. Des évolutions comparables concernent les bassins de l'Isère à Saint-Gervais, du Drac à Fontaine, de l'Ubaye à Barcelonnette et du Doubs à Conclavon.

Débit en m³/s

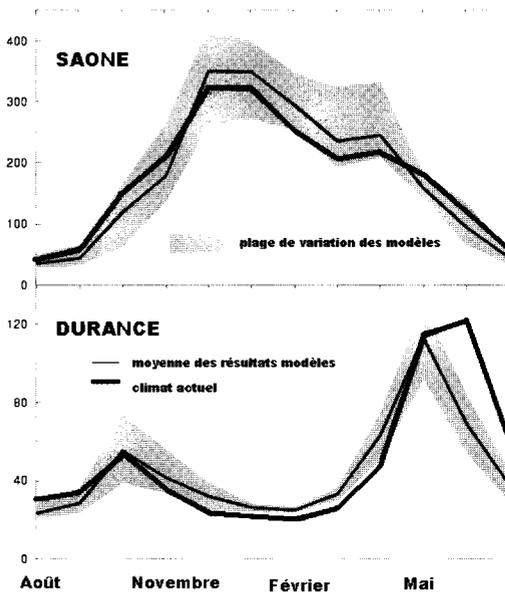


Figure 3 : comparaison cycle actuel avec résultats modèle (source GICC Rhône)

Par ailleurs, les étiages seront un peu plus prononcés en juillet et en août. L'écoulement moyen sera en diminution, en raison d'une évaporation plus intense. Les débits hivernaux seront plus élevés, ce qui résulte des effets de la glace sur le haut bassin qui stocke l'eau. Mais le manteau neigeux sera réduit de 50 % en équivalent eau, et la fonte avancée d'un mois environ.

Sous-bassin Saône

Des évolutions comparables apparaissent pour le bassin de la Saône (figure 3) bien que plus dispersées au niveau des débits. Sur ce bassin, la dynamique nivale n'est pas déterminante et le changement climatique ne s'accompagne pas d'un décalage temporel marqué du régime hydrologique. En donnant à tous les

scénarios le même poids, on note une augmentation de 10% des débits hivernaux et une réduction un peu plus faible des débits d'été.

Le sous-bassin Saône n'est pas soumis à glaciation dans le haut bassin. Des différences apparaissent aussi, avec une augmentation du débit moyen sur les pics de crue, et une diminution sur la période hivernale. Les anomalies du manteau neigeux pourraient avoir un impact hydrologique important.

3.2. Bassin Adour-Garonne

Le modèle SAFRAN – ISBA – MODCOU a été également testé sur le bassin de la Garonne et celui de l'Adour. Les résultats obtenus montrent que les modèles prévoient un impact plus important sur les Pyrénées que sur les Alpes, du fait d'une altitude plus faible et d'une augmentation plus modérée des précipitations hivernales, avec des étiages plus précoces, dans un bassin où les usages de l'eau posent déjà des problèmes en raison de l'augmentation des cultures irriguées au cours de ces dernières années (plus de 50% des débits d'étiage de l'Adour sont actuellement utilisés pour l'irrigation du maïs). Les réserves d'eau souterraines peuvent être notablement affectées par des perturbations de leur alimentation hivernale et printanière et impacter sur les débits d'étiage.

3.3. Bassin Seine

Les travaux menés dans le cadre du GICC Seine sont en cours, sur le même scénario que le GICC Rhône, à savoir doublement du CO₂.

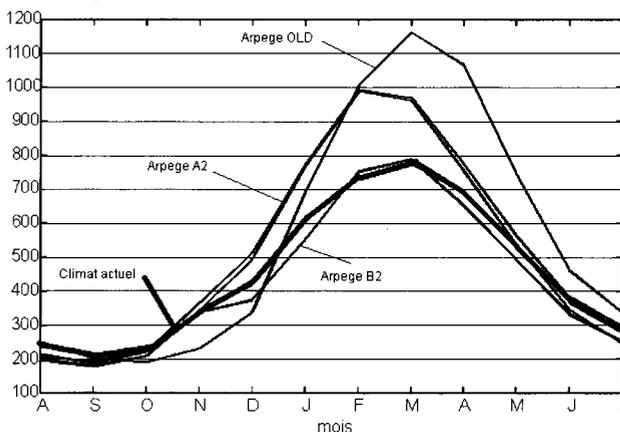


Figure 4 : débits calculés de la Seine à Poses (en m³/s)

Trois scénarios de changement climatique ont été construits à partir des simulations de changement climatique par le modèle ARPEGE de Météo-France (OLD, B2, A2) qui diffèrent par le scénario d'émission en gaz à effet de serre et par la version du modèle ARPEGE (B2 et A2 versions plus récentes et de meilleure résolution).

Ils s'accordent sur une augmentation de la température (de 2,4 à 3,4°C), qui provoque une

augmentation de l'ETP et donc des étiages plus sévères en été. Ils présentent des changements différents des précipitations : inchangées selon B2 et A2, en augmentation en hiver selon OLD.

L'impact des changements climatiques sur l'hydrosystème du bassin de la Seine a été examiné grâce au modèle MODCOU (modèle couplé surface/aquifère). La période de référence couvre 1070-1990.

L'impact sur l'hydrogramme à Poses (figure 4) peut se résumer par une augmentation des crues l'hiver et une accentuation des étiages d'été et d'automne. Les scénarios climatiques différents conduisent à des hydrogrammes substantiellement différents :

- Pour les scénarios OLD et A2 ils augmentent alors que pour B2 ils diminuent
- Dans l'ensemble du bassin, les variations de débit moyen annuel ont une distribution spatiale différente selon les scénarios (contraste amont/aval)
- Les variations piézométriques sont relativement faibles (amplitudes inférieures à 1 m, sauf pour B2 qui montre des baisses plus importantes de la nappe)
- Sur le plan de la qualité des eaux, les deux scénarios mettent en évidence une dégradation de la qualité bio géochimique de la Seine. L'effet le plus important est lié à l'augmentation des concentrations en nutriments quand le débit baisse en été pour les deux scénarios mais aussi en hiver pour les scénarios A2 et B2. Les impacts sur la qualité bio géochimique de la Seine sont importants à l'aval (Marne, Oise et Seine) avec une réduction des débits.

CRITIQUE DE LA METHODE

Plusieurs critiques peuvent être formulées à l'encontre de la démarche empruntée : certaines proviennent des hypothèses émises, d'autres des outils utilisés.

Les données qui sont injectées dans les MCG et les modèles hydrologiques souffrent d'une certaine incertitude.

Les travaux du GICC, postérieurs à ceux du GIEC ont limité le nombre de scénarios (A2 et B2). Bien que les écarts sensibles apparaissent dans les résultats, ils semblent cependant cohérents.

Il faut tout de même demeurer critique au vu des outils utilisés, qui sont des outils très généraux, qui bien que calés sur des événements passés, peuvent tout de même conduire à des projections audacieuses. Il convient en effet de souligner que les outils de simulation déterministes ne sont fiables que lorsque les hypothèses envisagées ne sortent pas du domaine de calibration. Or le changement climatique se situe par définition bien au-delà de ces limites.

CONCLUSION – PERSPECTIVES

En partant des travaux du GIEC qui ont défini des scénarios d'évolution du climat, le MEDD a jugé opportun de décliner ces perspectives au niveau de sous-bassins. Dans le cadre des projets GICC, des équipes de chercheurs se sont penchées sur l'évolution du climat dans les bassins du Rhône, de la Garonne et de la Seine. Des modèles basés sur un doublement du CO₂ ont été mis en œuvre et montré des évolutions sensibles du régime hydrologique.

Ces études à l'horizon de 50 ans identifient les points d'inquiétude suivants :

- Anticipation des phénomènes d'étiage : un mois sur le bassin du Rhône, à l'étude sur le bassin de la Garonne

- Accroissement de l'évapotranspiration et modification des calendriers agricoles
- Multiplication de crues méditerranéennes
- Risques concernant certaines zones côtières qui pourraient être sensibles à une augmentation du niveau de la mer

Globalement, les études mettent moins en évidence un risque de réduction des écoulements annuels qui pourraient être accrus, qu'un risque d'extension des phénomènes extrêmes : périodes de sécheresses et d'inondations.

Il s'agit ensuite d'identifier les impacts de ces évolutions sur les différents sous-systèmes d'utilisation de la ressource hydrologique : demande du milieu naturel, demande en eau potable, de l'agriculture irriguée, de l'hydroélectricité. Par exemple, des questions du type : peut-on avancer ou retarder les dates de semis pour s'adapter à la disponibilité en eau en gardant les mêmes objectifs de rendement ? Quelles stratégies d'adaptation faut-il adopter au niveau des pratiques culturales, pour pallier le déficit prévisible en eau d'irrigation ? sont autant d'interrogations pertinentes que les acteurs se posent.

Il s'agit également comme le fait le GICC Seine de renforcer le dialogue avec les acteurs du domaine, pour faire émerger les enjeux de gestion de l'eau les plus importants. Il s'agit également pour les scientifiques d'identifier les évolutions possibles des usages de l'eau qui pourraient modifier les répercussions du changement climatique sur le bassin.

Parmi les principaux enjeux de la gestion de l'eau, ont été identifiés la fourniture d'eau potable, les inondations, le débordement des réseaux et le traitement de la pollution par temps de pluie, l'irrigation. Il convient de noter que les modélisations réalisées dans le cadre de ces projets ne permettent pas de mettre en évidence des évolutions concernant les périodes de retour de crues, par exemple comment une crue de type 1910 à Paris serait modifiée sous changement climatique.

Bibliographie

Redaud JL, Noilhan J., Gillet M., HUC m., BEGNI G., 2002, "Changement climatique et impact sur le régime des eaux en France – document réalisé pour le compte de l'UICN à la demande de la MIES", 41 p.

Des informations pertinentes sur les changements climatiques ainsi que toutes les références bibliographiques se trouvent sur plusieurs sites Web :

<http://www.ipcc.ch> : site du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), créé en 1998 par l'OMM et le PNUE, et qui recouvre 99 pays membres. Trois rapports très intéressants sont consultables sur ce site. Ils ont été élaborés par 122 auteurs et rassemblent 515 contributions.

<http://www.effet-de-serre.gouv.fr/> : site de la Mies (Mission interministérielle sur l'effet de serre), organisme français qui dépend du Premier ministre et du ministère de l'Écologie et du Développement durable.

<http://www.environnement.gouv.fr> : site du ministère qui conduit divers programmes de recherche sur les changements climatiques sur les bassins français.

http://sisyphe.jussieu.fr/internet/gicc/MEDD_4juin03.html : site des équipes de recherches du programme " Changement Climatique " du MEDD sur lequel sont reportés les résultats des actions GICC Rhône et GICC Seine.

Evolution à long terme des régimes hydrologiques

Long term variability of river flow regimes

ETIENNE FROSSARD

Coyne et Bellier
9 Allée des Barbanniers 92632 Gennevilliers Cedex
Tel. 01 41 85 03 64
Fax 01 41 85 03 74
E.mail : etienne.frossard@coyne-et-bellier.fr

HENRI GARROS-BERTHET

Coyne et Bellier
9 Allée des Barbanniers 92632 Gennevilliers Cedex
Tel. 01 41 85 03 44
Fax 01 41 85 03 74
E.mail : henri.garros@coyne-et-bellier.fr

Résumé

L'analyse des apports annuels de huit bassins versants situés en Afrique, Europe et Amérique montre des contrastes importants.

Abstract

The analysis of yearly inflows of eight catchments located in Africa, Europe and America discloses important contrasts.

Mots-clés : Régime hydrologique, changement climatique

Keywords : River flow regime, climate change

Introduction

Dans le cadre de leurs activités, les ingénieurs de Coyne et Bellier étudient les fleuves et les rivières du monde. La variabilité dans le temps des ressources en eau montrée par ces analyses, est un souci ancien pour les experts en ressources en eau, qui rejoint le débat actuel sur le changement du climat. Ainsi, les sécheresses africaines, les désastres dus aux cyclones tropicaux et ceux dus aux Niños engagent l'ingénieur à une approche prudente.

Cet article s'appuie sur les données utilisées lors de diverses études. On y analyse les apports et pluies annuels de quelques bassins versants en Afrique, France et Amérique. Il s'agit des fleuves, rivières et bassins versants suivants :

En Afrique, l'article compare les apports annuels de six cours d'eau : Le Zambèze à Victoria Falls, le Nil à Assouan, le Chari à N'Djamena, le Niger à Tossaye, le Sénégal à Bakel, l'Oued Hammam à Bou Hanifia. Parmi ces six bassins versants, celui du Zambèze est dans l'hémisphère sud et celui de l'oued Hammam est en Algérie.

En Europe, la rivière Ain à Cernon (France) procure une information relative au climat tempéré. En Amérique centrale, on a retenu la pluie moyenne du bassin versant de Gatun, qui alimente le Canal de Panama.

Présentation des bassins versants

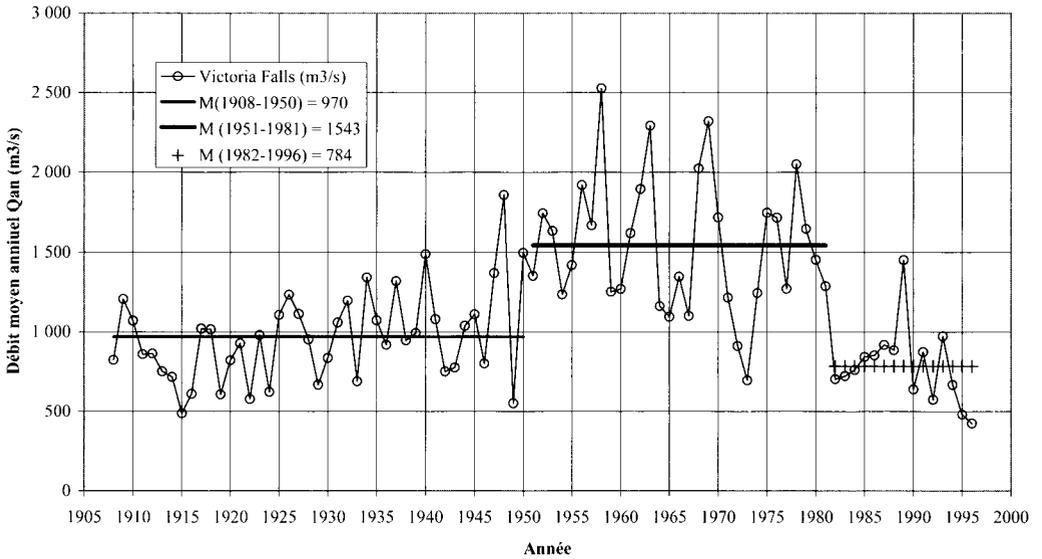
Pour chacun des huit bassins, on montre les apports annuels pour la plus longue durée d'observations disponible. L'analyse des apports conduit à distinguer plusieurs périodes. Ainsi, pour le Zambèze on distingue trois périodes. Pour le Nil à Assouan, on dispose de 124 ans d'observations se décomposant en trois périodes. Le Chari, le Niger, le Sénégal, et l'Oued Hammam ont chacun deux périodes à régime contrasté. L'Ain à Cernon ne montre pas de contrastes affirmés. Les pluies du bassin versant de Gatun dénotent des sécheresses plus importantes dans les années récentes.

Le Nil à Assouan mérite une mention spéciale. En effet, sous réserve de la représentativité de la période 1870 à 2000, on note une tendance à la décroissance des débits. Mais la différence entre la période 1870/2000 et la période 1901/1970 est due uniquement à des causes naturelles. L'effet de l'homme sur le climat ne concernerait que le contraste entre 1901/1970 et 1971/2000.

Pour le Zambèze à Victoria Falls, les observations (de 1908 à 1996) mènent à considérer trois périodes. De 1908 à 1951, le module est de 970 m³/s. De 1951 à 1981, le débit moyen est de 1 543 m³/s soit 159% du module précédent. De 1981 à 1996, le module atteint 784 m³/s soit 51% de 1 543 m³/s.

Planche 1 Zambèze à Victoria Falls - Apports annuels de 1908 à 1996

Zambèze à Victoria Falls - Apports annuels de 1908 à 1996



Période	1908-1950	1951-1981	1982-1996	1908-1996
n	43	31	15	89
M	970	1 543	784	1 138
S	287	425	245	451
Cv	0.30	0.28	0.31	0.40
Me	953	1 452	761	1 069
Max	1 858	2 528	1 451	2 528
Min	487	695	424	424
Max/Min	3.81	3.64	3.42	5.97

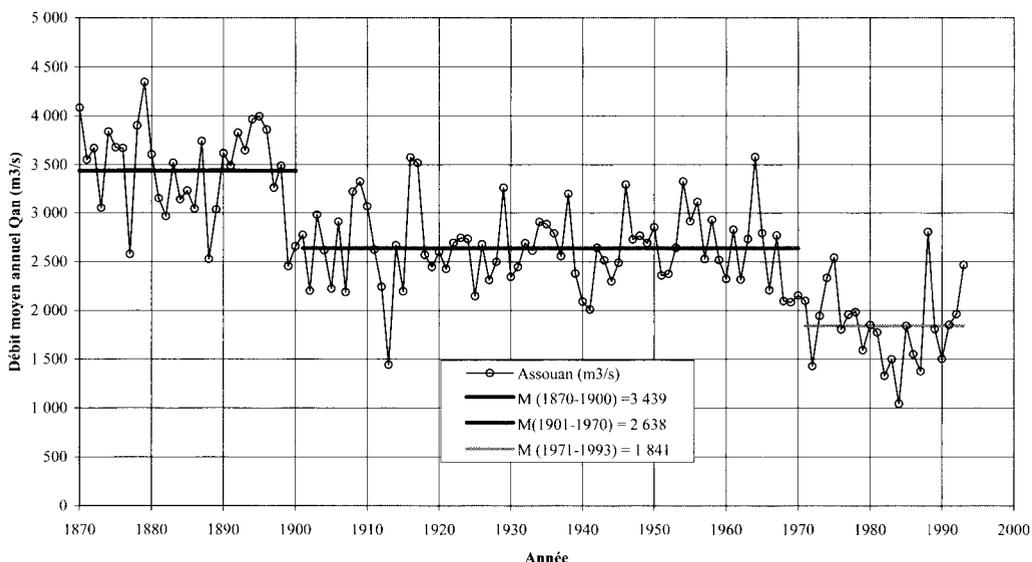
Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1915/1916, 1919, 1922, 1924, 1950, 1972/1973, 1982 à 1984, 1990, 1992, 1994 à 1996).

Pour le Nil à Assouan, on a pu disposer des apports annuels de 1870 à 1993. Au cours de ces 124 ans, se notent trois périodes contrastées. De 1870 à 1900, le module vaut 3 439 m³/s. De 1901 à 1970, le débit moyen est de 2 638 m³/s, c'est à dire 77% du module précédent. Enfin, de 1971 à 1993, le module atteint 1 841 m³/s c'est à dire 70% de la moyenne de la période 1901 à 1970.

Planche 2 - Nil à Assouan - Apports annuels

Nil à Assouan - Apports annuels de 1870 à 1993



Période	1870-1900	1901-1970	1971-1993	1870-1993
N	31	70	23	124
M	3 439	2 638	1 841	2 690
S	482	406	418	677
Cv	0.14	0.15	0.23	0.25
Me	3 551	2 632	1 841	2 649
Max	4 344	3 578	2 804	4 344
Min	2 454	1 443	1 043	1 043
Max/Min	1.77	2.48	2.69	4.17

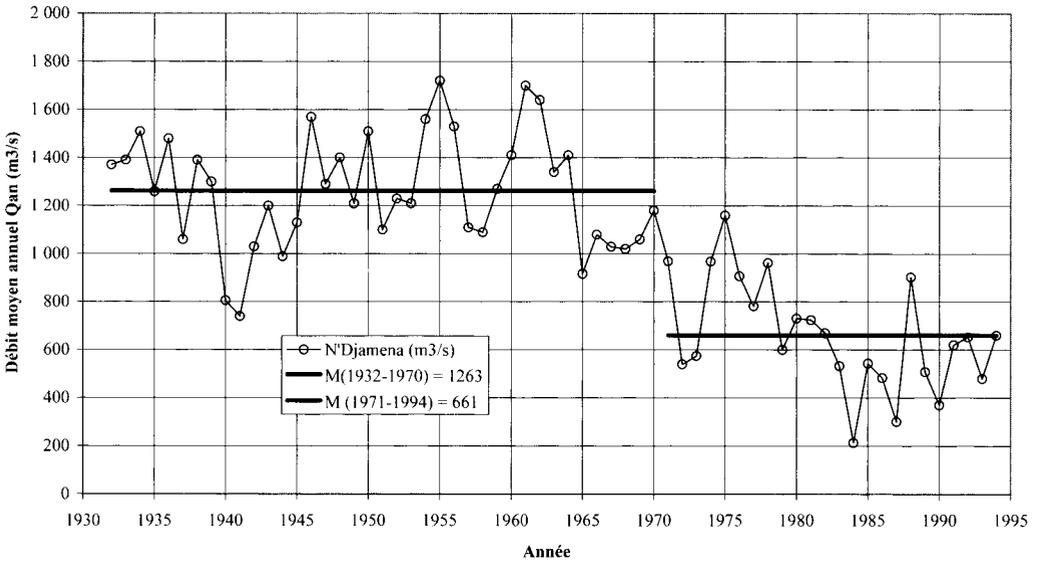
Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1913, 1940/1941, 1972, 1982 à 1987, 1989 à 1991).

Pour le Chari à N'Djamena, la monographie de l'IRD mentionne 63 ans d'apports annuels. Pour la période 1932 à 1970, le module est de 1 263 m³/s. De 1971 à 1994, le débit moyen est 661 m³/s. (Soit 52% de 1 263 m³/s)

Planche 3 - Chari à N'Djamena - Apports annuels de 1932 à 1994

Chari à N'Djamena - Apports annuels de 1932 à 1994



Période	1932-1970	1971-1994	1932-1994
N	39	24	63
M	1 263	661	1 033
S	238	231	376
Cv	0.19	0.35	0.36
Me	1 260	637	1 060
Max	1 720	1 160	1 720
Min	739	214	214
Max/Min	2.33	5.42	8.04

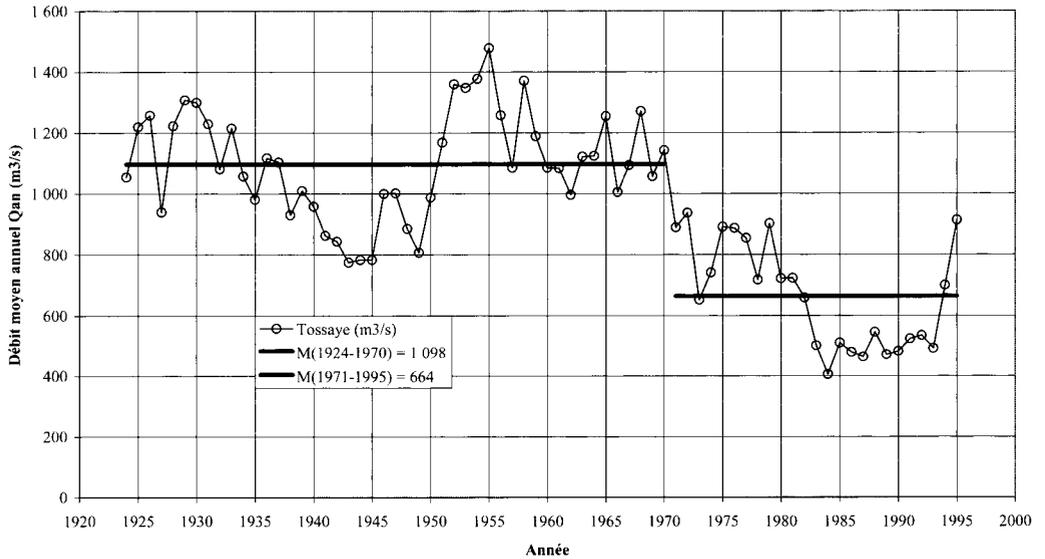
Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1940 à 1945, 1957/1958, 1972/1973, 1983 à 1987, 1989 à 1994).

Pour le Niger à Tossaye, 72 années d'apports sont disponibles. On note une période antérieure à 1971, de module 1 098 m³/s. La période postérieure à 1971 a un débit moyen de 664 m³/s soit 61% de 1 098 m³/s.

Planche 4 - Niger à Tossaye - Apports annuels de 1924 à 1995

Niger à Tossaye - Apports annuels de 1924 à 1995



Période	1924-1970	1971-1995	1924-1995
n	47	25	72
M	1 098	664	947
S	174	175	271
Cv	0.16	0.26	0.29
Me	1 085	659	985
Max	1 478	937	1 478
Min	775	405	405
Max/Min	1.91	2.31	3.65

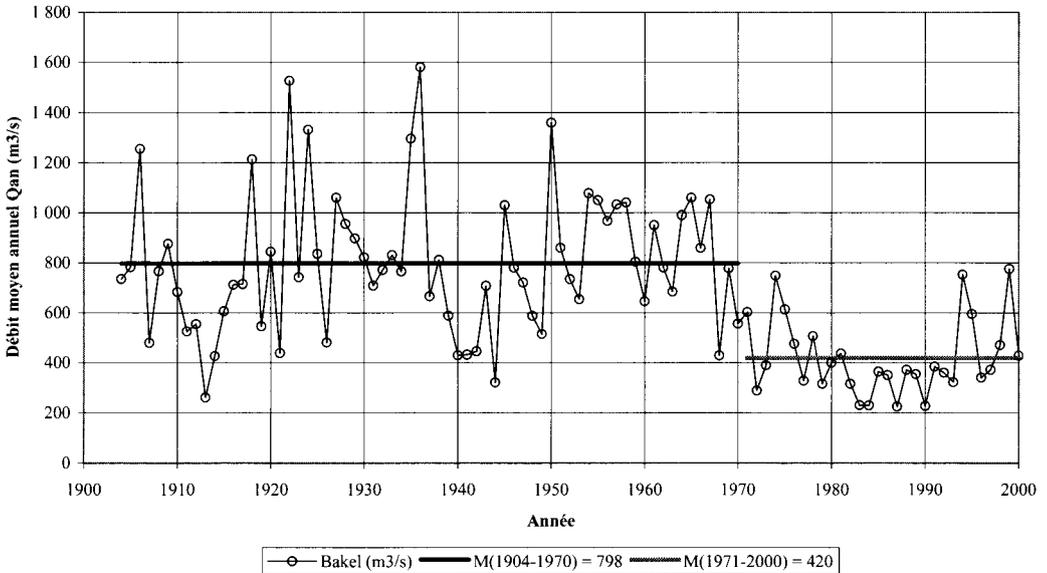
Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1927, 1935, 1941 à 1945, 1948/1949, 1973, 1983 à 1993).

Pour le Sénégal à Bakel, on connaît les apports annuels de 1904 à 2000. On note deux périodes contrastées. De 1904 à 1970, le module vaut 798 m³/s. De 1971 à 2000, le débit moyen est de 420 m³/s soit 53% de celui de la première période. Pour le Sénégal, le contraste entre les périodes antérieure et postérieure à 1970 est plus accusé que sur le Nil. (53% comparé à 70%)

Planche 5 - Sénégal à Bakel - Apports annuels

Sénégal à Bakel - Apports annuels de 1904 à 2000



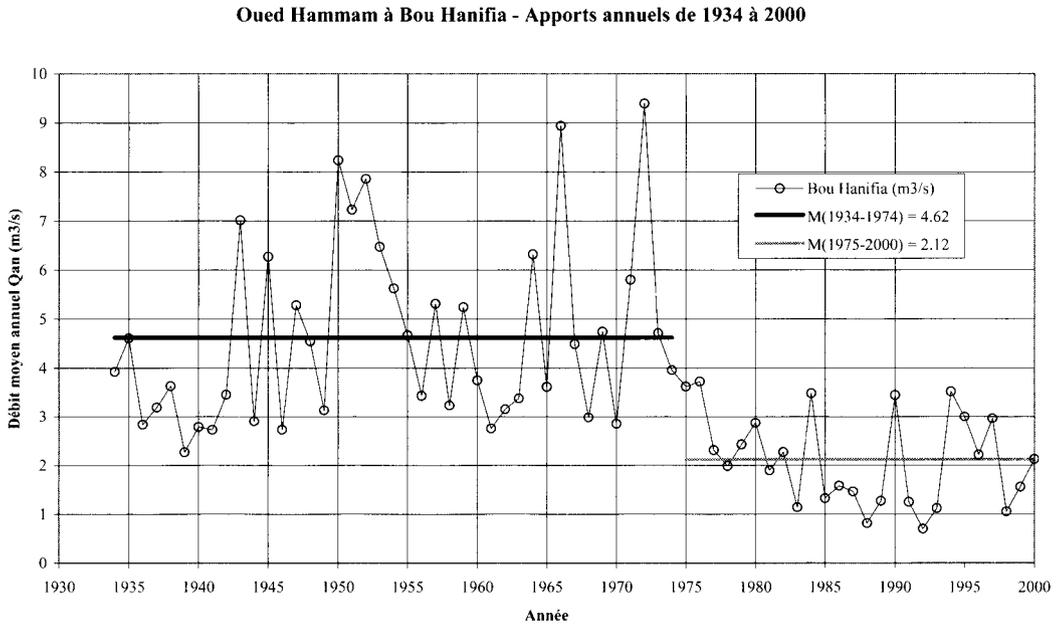
Période	1904-1970	1971-2000	1904-2000
n	67	30	97
M	798	420	681
S	279	155	303
Cv	0.35	0.37	0.44
Me	772	372	683
Max	1 581	776	1 581
Min	262	225	225
Max/Min	6.05	3.44	7.02

Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1913/1914, 1921, 1926, 1940 à 1942, 1944, 1971/1972, 1977, 1979 à 1993, 1996, 1997).

Pour l'oued Hammam à Bou Hanifia, les données (1934 à 2000) montrent deux périodes. La première (1934 à 1974) a un module de 4.62 m³/s. La seconde (1975 à 2000) a un débit moyen de 2.12 m³/s soit 46% du premier.

Planche 6 - Oued Hammam à Bou Hanifia - Apports annuels de 1934 à 2000



Période	1934-1974	1975-2000	1934-2000
n	41	26	67
M	4.62	2.12	3.65
S	1.86	0.95	1.99
Cv	0.40	0.45	0.54
Me	3.95	2.05	3.24
Max	9.39	3.72	9.39
Min	2.27	0.70	0.70
Max/Min	4.14	5.32	13.43

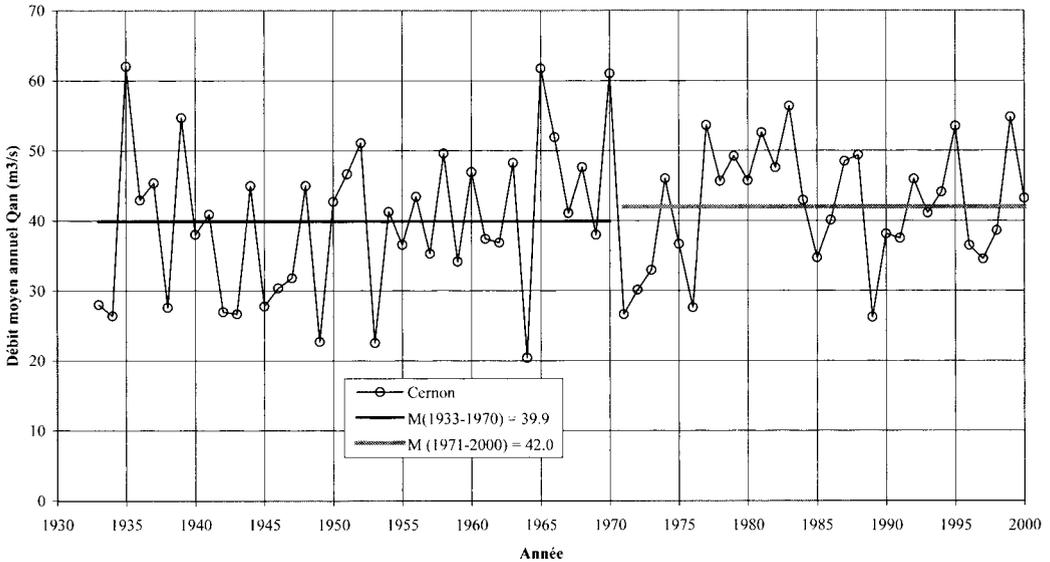
Unités : m³/s

On notera les sécheresses marquantes (1936 à 1942, 1944, 1946, 1949, 1961 à 1963, 1968, 1970, 1983, 1985 à 1989, 1991 à 1993, 1998/1999).

Pour l'Ain à Cernon, les 68 ans d'observations ne montrent pas un grand contraste entre les périodes. Pour 1933-1970, le module est de 39.9 m³/s. Pour 1971-2000, il est de 42 m³/s soit 105% du premier module.

Planche 7 - Ain à Cernon - Apports annuels de 1933 à 2000

Ain à Cernon - Apports annuel de 1933 à 2000



Période	1933-1970	1971-2000	1933-2000
n	38	30	68
M	39.9	42.0	40.8
S	11.1	8.6	10.0
Cv	0.28	0.20	0.25
Me	41.0	43.1	41.2
Max	62.0	56.4	62.0
Min	20.4	26.2	20.4
Max/Min	3.04	2.15	3.04

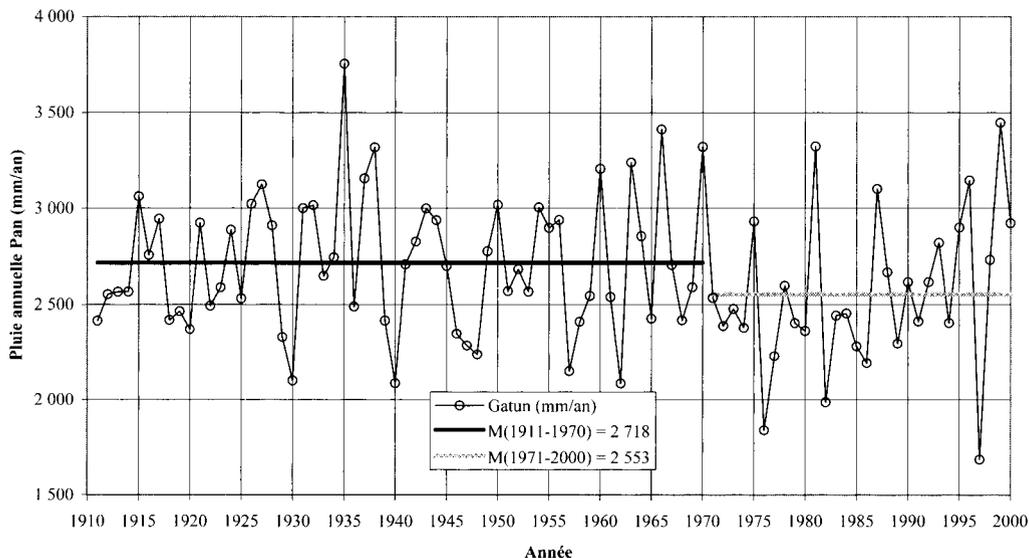
Unités : m³/s

On notera que les sécheresses antérieures à 1970 sont plus prononcées que celles postérieures à 1970. Les sécheresses marquantes sont 1933, 1934, 1938, 1942, 1943, 1945, 1949, 1953, 1964, 1971, 1976, 1989.

Les pluies du bassin versant de Gatun sont disponibles pour 1911 à 2000 (90 ans). La moyenne de 1911-1970 s'établit à 2 718 mm/an. Celle de 1971-2000 vaut 2 553 mm soit 94% de la moyenne de la période précédente.

Planche 8 - Bassin versant de Gatun - Pluies annuelles de 1911 à 2000

Bassin versant de Gatun - Pluie annuelle de 1911 à 2000



Période	1911-1970	1971-2000	1911-2000
n	60	30	90
M	2 718	2 553	2 663
S	354	403	377
Cv	0.13	0.16	0.14
Me	2 691	2 465	2 593
Max	3 754	3 446	3 754
Min	2 085	1 685	1 685
Max/Min	1.80	2.05	2.23

Unités : mm/an

Les sécheresses marquantes sont : 1929, 1930, 1940, 1946 à 1948, 1957, 1962, 1976, 1982, 1984/1985, 1997. L'année la plus sèche est 1997.

Synthèse sur les sécheresses

Notons d'abord sur les diagrammes, que des bassins versants aussi éloignés que ceux du Nil, le Chari, le Niger, le Sénégal, et l'Oued Hammam présentent tous sur la période 1972-1994, un fort déficit hydrologique par rapport aux époques antérieures. Sur la même période, un déficit quoique moins prononcé, apparaît aussi dans l'hydrologie du bassin de Gatun au Panama.

Par ailleurs, une analyse plus fine sur des périodes plus courtes, indique d'autres coïncidences. Les planches ci-après donnent les années sèches observées pour les huit bassins versants. On constate que plusieurs sécheresses sont communes. Ainsi, une séquence sèche s'observe entre 1911 et 1915 à Victoria Falls, Assouan, Bakel et Gatun. La sécheresse 1919-1924 à Victoria Falls est observée en partie à Assouan, Bakel et Gatun.

La sécheresse observée entre 1934 et 1950 à Bou Hanifia se retrouve aussi, pour partie, à Assouan, N'Djamena, Tossaye, Bakel, Cernon et Gatun.

La sécheresse des années 1965 à 1973 observée à N'Djamena se retrouve en partie à Assouan, Tossaye et Bakel. La sécheresse des années 1982 à 1993 est assez généralement répartie.

Conclusions

Les cas cités plus haut montrent que l'impact des activités humaines sur le climat se combine à une forte variabilité naturelle. Cette forte variabilité naturelle, antérieure à l'existence de l'homme, a toujours conditionné les activités humaines, comme en témoignent les écrits d'Égypte ancienne, de Mésopotamie, ou d'ailleurs.

Sur le long terme qui nous concerne, les données détaillées ici montrent que les apports hydrologiques ont toujours comporté des périodes excédentaires ou déficitaires (relativement à une moyenne de long terme) qui peuvent s'étendre sur plusieurs décennies, voire un demi-siècle (voir le Zambèze 1905-1950, ou le Nil 1900-1965).

Certaines de ces périodes majeures apparaissent corrélées sur de très vastes régions, comme la grande sécheresse africaine de la période 1972-1974, que certaines études associent à une oscillation de long terme, affectant des centres d'action climatiques majeurs (telles que la position moyenne de l'Anticyclone des Açores).

Généralement, on accepte que le réchauffement de la Terre conduira d'une part à des étiages plus sévères et d'autre part à des crues plus importantes. Au niveau annuel, la combinaison de ces deux aspects peut se traduire par des effets contrastés allant de la diminution des apports à leur augmentation en passant par le maintien du statu quo actuel.

Par le passé, de nombreux aménagements hydrauliques ont été dimensionnés en tenant compte d'analyses de sensibilités aux divers risques dont le risque hydrologique. Une telle approche semble toujours adaptée. Elle mérite un approfondissement prenant en compte les idées actuelles sur le climat du futur. Cette prudence renforcée pourrait conduire à favoriser une construction en étapes de plus nombreux projets.

Crédits

Les auteurs tiennent à remercier l'Autorité du Canal de Panama (Panama), l'Agence Nationale des Barrages (Algérie), l'Institut de Recherche en Développement (France), l'Organisation pour la Mise en Valeur du Sénégal, le Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Hydraulique (Mali) ainsi que la Zambezi River Authority.

Planche 9 - Sécheresses entre 1900 et 1939

Année	Victoria Falls	Assouan	N'Djamena	Tossaye	Bakel	Bou Hanifia	Cernon	Gatun
1900								
1901								
1902		S						
1903								
1904					S			
1905		S			S			
1906								
1907		S			S			
1908	S				S			
1909								
1910					S			
1911	S	S			S			S
1912	S	S			S			S
1913	S	S			S			S
1914	S	S			S			S
1915	S	S			S			
1916	S				S			
1917					S			
1918		S						S
1919	S	S			S			S
1920	S	S						S
1921	S	S			S			
1922	S							S
1923	S				S			S
1924	S			S				
1925		S						S
1926		S			S			
1927		S		S				
1928	S	S						
1929	S							S
1930	S	S						S
1931		S			S			
1932				S	S			
1933	S						S	S
1934				S	S	S	S	
1935				S		S		
1936						S		S
1937			S		S	S		
1938				S		S	S	
1939		S		S	S	S		S

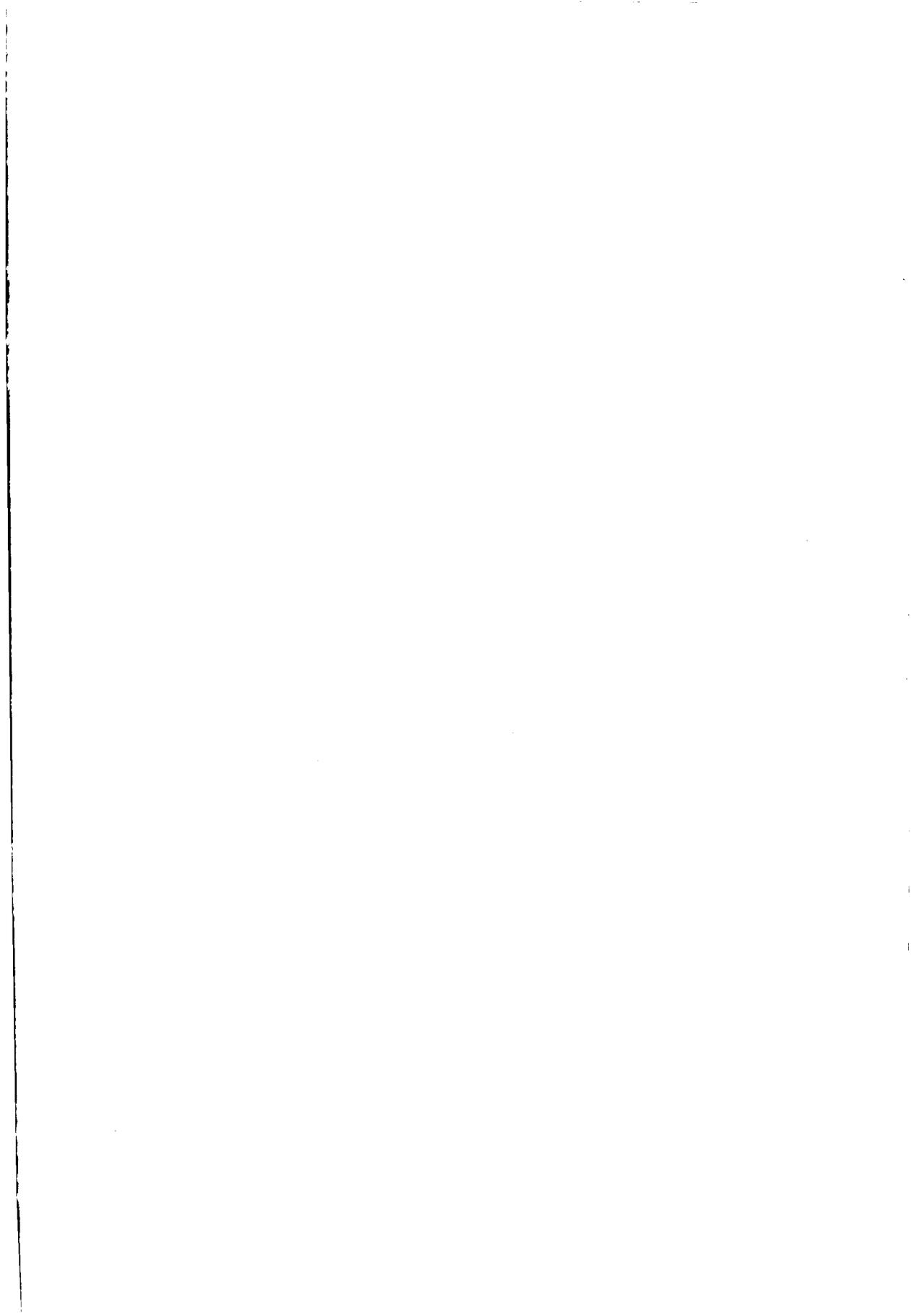
Planche 10 - Sécheresses entre 1940 et 1979

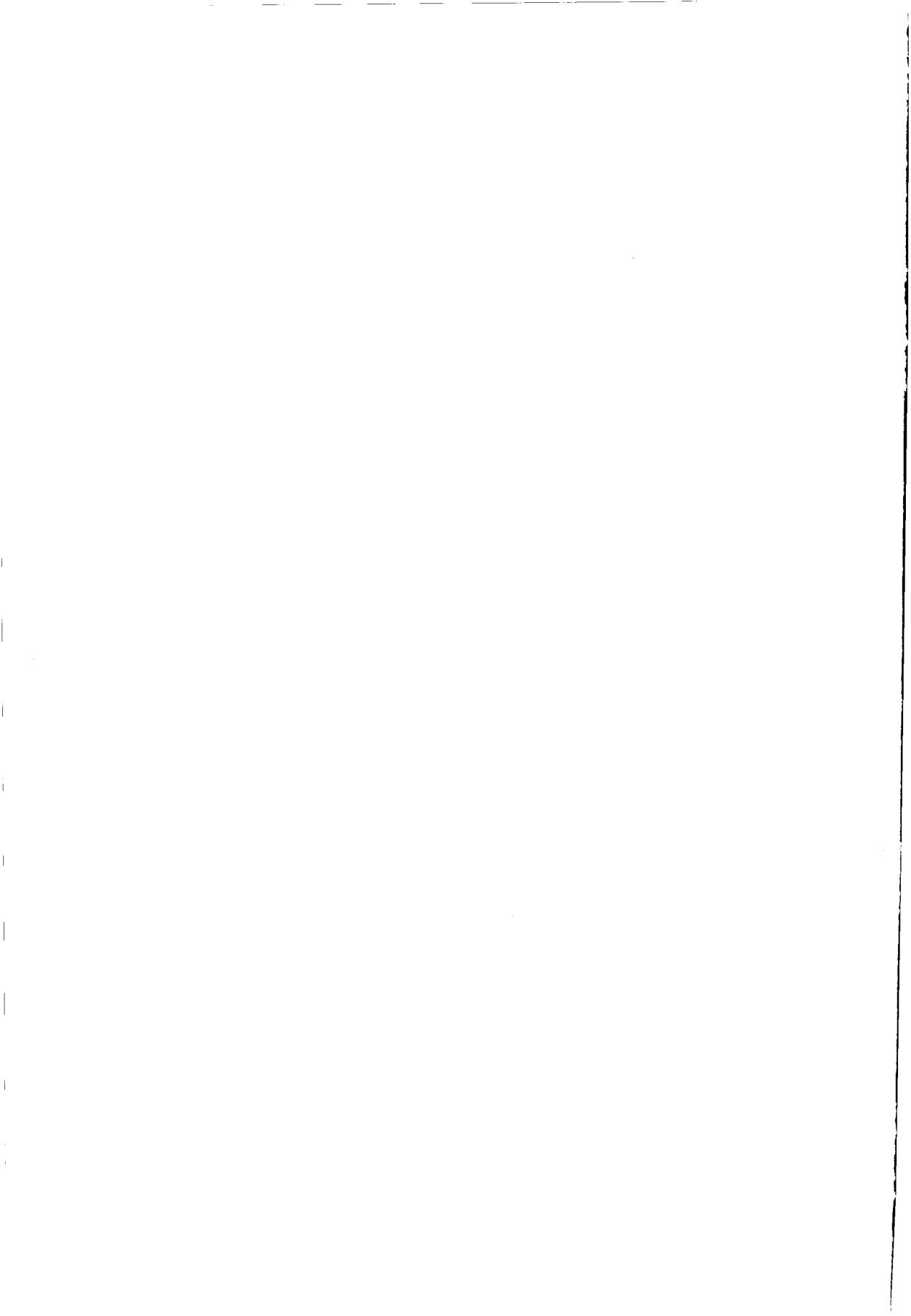
Année	Victoria Falls	Assouan	N'Djamena	Tossaye	Bakel	Bou Hanifia	Cernon	Gatun
1940		S	S	S	S	S	S	S
1941	S	S	S	S	S	S		S
1942	S		S	S	S	S	S	
1943		S	S	S	S		S	
1944		S	S	S	S	S		
1945		S	S	S			S	S
1946	S			S	S	S	S	S
1947				S	S		S	S
1948				S	S	S		S
1949	S		S	S	S	S	S	
1950	S			S				
1951	S	S	S					S
1952		S	S		S			S
1953			S		S		S	S
1954	S							
1955	S						S	
1956						S		
1957			S	S			S	S
1958			S			S		S
1959	S	S					S	S
1960	S	S		S	S	S		
1961				S		S	S	
1962		S		S	S	S	S	S
1963					S	S		
1964							S	
1965	S		S			S		S
1966	S	S	S	S				
1967	S		S			S		
1968		S	S			S		S
1969		S	S	S	S		S	S
1970		S	S	S	S	S		
1971	S	S	S	S	S		S	S
1972	S	S	S	S	S		S	S
1973	S		S		S		S	S
1974	S					S		S
1975						S	S	
1976						S	S	S
1977	S				S	S		S
1978						S		
1979		S	S		S			S

Planche 11 - Sécheresses entre 1980 et 2000

Année	Victoria Falls	Assouan	N'Djamena	Tossaye	Bakel	Bou Hanifia	Cernon	Gatun
1980	S	S			S			S
1981	S	S				S		S
1982	S	S		S	S			S
1983	S	S	S	S	S	S		S
1984	S	S	S	S	S			S
1985		S	S	S	S	S	S	S
1986		S	S	S	S	S	S	S
1987		S	S	S	S	S		
1988				S	S	S		
1989		S	S	S	S	S	S	S
1990	S	S	S	S	S		S	
1991		S	S	S	S	S	S	S
1992	S		S	S	S	S		
1993			S	S	S	S	S	
1994	S		S					S
1995	S							
1996	S					S	S	
1997						S	S	S
1998							S	S
1999							S	
2000							S	







Cet ouvrage constitue la restitution des communications exposées lors du colloque technique « Barrages et développement durable en France », organisé à Paris le 18 novembre 2003 conjointement par le Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et le ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD).

Il s'agit en fait d'une revue de l'état actuel des expériences et des perspectives touchant à l'impact social et environnemental des barrages français : *barrages et risques, bilan socio-économique et culturel de l'implantation des ouvrages, les impacts sur les milieux physiques et biologiques, barrages et l'évolution du climat...*

Ces réflexions et expériences constituent une contribution française aux travaux de la Commission Internationale des Grands Barrages sur la prise en compte des préoccupations environnementales.



ISBN 2-85362-624-5

Prix : 33,50 €



9 782853 626248