

*Influence des activités de l'homme
sur le cycle hydrométéorologique*

QUESTION V
RAPPORT
GÉNÉRAL

**INFLUENCE
DES GRANDS AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES
SUR LE CYCLE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE
ET L'ENVIRONNEMENT**

J. A. RODIER

Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M., Paris.

Tout grand ouvrage hydraulique, que ce soit un grand barrage, un canal, un ouvrage portuaire, est conçu de telle façon qu'il puisse remplir la fonction ou les fonctions qu'on lui a assignées, après adaptation aux conditions d'aménagement du site (topographie, géologie, conditions climatiques, etc.). Et, dans certains cas, cela n'est déjà pas si facile de concilier les exigences parfois contradictoires des diverses fonctions de l'ouvrage. Par exemple, les besoins de la production d'énergie, de l'irrigation et de la protection contre les crues, dans le cas d'un grand réservoir.

Mais, en outre, tout grand ouvrage exerce sur le cycle hydrométéorologique et sur l'environnement une action qui, sans faire partie des objectifs qu'on a imposés à l'ouvrage, est loin d'être négligeable. Tant que le nombre de ces ouvrages est resté faible et leur influence limitée dans l'espace par leurs modestes dimensions, on pouvait tolérer dans une zone localisée une situation désagréable, ou un nouvel écosystème beaucoup moins intéressant. Mais actuellement l'influence de l'homme sur notre pauvre planète est telle que c'est toute la nature qui s'en trouverait transformée si on n'y prenait garde, et, en général, les effets de cette transformation ne sont pas heureux. La situation actuelle est telle que, même au fond de l'Afrique, comme nous avons pu personnellement en faire l'expérience, il est bien difficile d'implanter par exemple un bassin représentatif présentant des conditions vraiment naturelles.

Bien entendu, ce très important problème a déjà été abordé sur le plan international depuis de nombreuses années : la Conférence Inter-gouvernementale de Stockholm (5-16 juin 1972) a

ce sujet. A l'UNESCO, on travaille activement sur un vaste programme de recherches : l'Homme et la Biosphère. Mais pour nous, Ingénieur, ce qui nous intéresse plus particulièrement ce sont les réunions comme celle-ci dans lesquelles le programme est limité à des sujets qui ne soient pas trop vastes et qui rassemblent à la fois hydrauliciens, constructeurs, spécialistes de l'exploitation, biologistes etc., ces deux conditions permettant des discussions fructueuses entre spécialistes de différentes disciplines et de différents pays, dans un temps relativement court.

Au cours des dernières années, deux Réunions Internationales répondaient à ces conditions : le Colloque de Knoxville et le dernier Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages. Nous en parlons brièvement ci-dessous.

**1. — QUELQUES INDICATIONS
SUR D'IMPORTANTES RÉUNIONS
ANTÉRIEURES SUR LE MÊME SUJET**

Un Colloque International sur les lacs artificiels, leurs problèmes spécifiques et leurs effets sur l'environnement a été organisé à Knoxville (Tennessee) en mai 1971 par le Comité Scientifique sur les recherches dans le domaine de l'eau du CIUS (COWAR) avec l'aide de l'Académie des Sciences des Etats-Unis et de la Tennessee Valley Authority. Le programme était très vaste, un grand nombre de limnologues, de biologistes et de sociologues y participaient au côté des hydro-

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 3966A

Cote : B

13 JUN 1994

CRISTON
HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

80904

logues, des hydrauliciens et des exploitants de barrages. Lors de ce Colloque, les petites retenues n'ont pas été négligées, mais on a porté une grande attention aux très grands réservoirs : lac Mead, réservoir de la Volta, lac Nasser, lac de Kariba sur le Zambèze, lac de Brokopondo au Surinam, lac Rybrisk en U.R.S.S., etc. Ils présentent tous une superficie supérieure à 1 000 km² et apportent un effet bénéfique certes, mais ils ont également sur la vie du pays des influences secondaires qu'il est impossible de négliger. Beaucoup sont situés en régions tropicales. Certains points ont été examinés de façon assez complète lors de cette réunion : les problèmes de sédimentation dans les réservoirs, de limnologie, de biologie et de sociologie. Les problèmes sanitaires qui se posent toujours pour les grands réservoirs tropicaux : (onchocercose, bilharziose, paludisme) n'ont pas été négligés; enfin, cinq rapports ont été présentés sur l'occurrence de secousses sismiques consécutives à la création de certains réservoirs. Parmi ces derniers rapports, l'un d'eux, celui du Professeur J.P. Rothe a fait une très forte impression sur les participants.

Un bon nombre de réservoirs étudiés étant aménagés en des endroits où la pêche constitue une des ressources essentielles, les biologistes se sont particulièrement intéressés à l'influence de la création et de l'exploitation de grands réservoirs sur la faune aquatique et les sociologues et économistes, à la réadaptation des pêcheurs après remplissage du réservoir.

Les problèmes d'eutrophisation ont occupé la place importante qui leur revenait ainsi que le développement excessif de la flore aquatique en particulier les jacinthes et les fougères d'eau (eichhornia et salvinia).

Les effets désastreux du remplissage des réservoirs sur la faune terrestre en région peu peuplée ont été évoqués.

Enfin, le déplacement des populations des zones submergées a été assez longuement étudié, ainsi que les problèmes de navigation sur les grands lacs artificiels.

Le Colloque a largement profité de l'expérience des spécialistes de la T.V.A. Parmi les conclusions, on trouve le principe important suivant : la fonction pour laquelle le barrage a été conçu ne correspond qu'à une partie des effets de l'ouvrage. L'influence de celui-ci sur les écosystèmes peut être aussi importante que l'effet bénéfique qu'on en escompte. La mise au point du projet doit donc être faite en tenant compte de toutes les influences de l'aménagement sur l'environnement. Dans certains cas, elle devrait être précédée d'une analyse des systèmes pour laquelle d'ailleurs très peu de communications donnent des principes méthodologiques. De même, l'exploitation des ou-

vrages doit tenir compte de toutes les conséquences des modifications artificielles du régime des eaux; en particulier, la hauteur de marnage devrait être étudiée en fonction des effets biologiques, ce qui pose souvent des problèmes extrêmement difficiles.

Le programme du XI^e Congrès International des Grands Barrages comportait « l'étude des conséquences de la construction des barrages sur l'environnement » (Question 40). Ce sujet avait été inscrit à l'ordre du jour à la demande du Comité Français. A ceux qui hésiteraient à absorber le contenu du gros livre rouge qui rassemble toutes les communications relatives à cette question, nous indiquons le remarquable rapport général de M. Ivan Cheret qui en fait la synthèse et également le compte rendu du Colloque Technique de 1972 du Comité Français des Grands Barrages au cours duquel les discussions, beaucoup plus libres qu'à Madrid, présentent certains points particulièrement intéressants.

Le titre de la question 40 est sensiblement le même que celui du Colloque de Knoxville, mais les rapports de biologistes ont été moins nombreux à Madrid et ils étaient en très petit nombre au Congrès. Par contre, on y trouve beaucoup plus de rapports résultant de la coopération entre biologistes et ingénieurs. Ceci est en particulier le cas pour le Comité Français dont les six rapports ont été élaborés par des Groupes de Travail pour la plupart pluridisciplinaires.

Qu'il me soit permis de dire ici, d'après mon expérience personnelle, que les échanges de vue sont généralement fructueux dans de tels groupes et qu'il en résulte beaucoup d'objectivité dans les documents élaborés à la suite de ces discussions.

Si on considère la substance des diverses communications, on peut faire les constatations suivantes :

Les problèmes de sédimentation ont été beaucoup moins souvent évoqués qu'à Knoxville. Signalons cependant un rapport français sur les problèmes d'érosion et de sédimentation dans le Rhône et le Rhin, trois rapports japonais, bulgare et anglais qui directement ou indirectement traitent de la limitation de la durée de vie des barrages du fait de l'alluvionnement et un rapport égyptien portant sur le grand barrage d'Assouan.

L'infiltration n'a donné lieu qu'à un rapport important, celui concernant les Portes de Fer.

L'influence des lacs sur la température, la pluviométrie et la formation de brouillard est traitée dans quatre rapports dont un sur le réservoir Seine.

La qualité des eaux n'est pas négligée; on a particulièrement insisté sur les problèmes liés à la fourniture d'eau potable.

J. A. RODIER | V. R.G.

Les études de limnologie sont presque absentes, les études générales des écosystèmes aquatiques sont peu nombreuses et les documents sur l'eutrophisation sont en très petit nombre; cependant certains documents, en particulier le rapport sur le réservoir Seine et le rapport du Groupe Français sur l'influence biologique, traitent de la qualité des eaux, en liaison avec les phénomènes biologiques.

Les rapports concernant les poissons et la pêche traitent surtout de deux problèmes: celui des saumons et des truites dans les rivières de latitude élevée et les problèmes analogues dans les rivières tropicales. Signalons une solution originale adoptée sur la rivière Mactaquac pour les saumons: on les prend à l'aval des barrages, 90 à 95 % de ces poissons sont transportés en camion à l'amont, 5 à 10 % sont amenés dans une station d'élevage qui déverse 500 000 jeunes par an dans la partie aval de la rivière.

Plusieurs rapports dont un concernant le Canada, d'autres dans les régions tropicales, montrent les effets nuisibles des modifications du régime des eaux (régularisations artificielles ou brutales éclusées) sur les populations de mammifères et d'oiseaux des vallées et des régions deltaïques situées à l'aval. Ces rapports sont très bien faits et assez objectifs, mais il faut bien noter que les vallées en question sont pour ces régions les endroits où se concentre la vie et qu'elles sont encore à l'état naturel. Ces rapports sont moins intéressants pour la France où les lits majeurs aménagés depuis longtemps ne contiennent plus la faune d'autrefois, mais les problèmes piscicoles restent entiers.

Le développement des maladies tropicales consécutif aux aménagements hydrauliques a été assez largement traité.

L'action sur l'homme n'est pas analysée tout à fait de la même façon. Comme à Knoxville, on évoque bien les problèmes de déplacement de populations, à la suite de l'aménagement de grandes retenues, mais on se préoccupe aussi des inconvénients (bruit et poussière) résultant de l'activité des chantiers et deux rapports traitent des mesures de protection de la population contre les risques de la rupture de barrage.

Quelques communications concernaient des essais d'étude générale de l'aménagement intégré, y compris la prise en compte de toutes les conséquences sur l'environnement. Il s'agit toujours d'aménagements importants: la réalisation du plan Delta aux Pays-Bas est l'exemple le plus frappant; les Néerlandais ont renoncé à présenter un bilan financier de l'opération. Ils ont classifié les éléments biologiques suivant des critères plus ou moins artificiels et on a évalué pour chacun de ces éléments botanique, ornithologique, etc. la va-

leur de l'amélioration ou de la dégradation. Puis on affecte chacun de ces éléments d'un coefficient et on fait la somme de tous ces éléments; on arrive à faire ainsi une espèce de bilan des avantages et des inconvénients, qui n'est pas le même, bien entendu, pour les îles, les plages ou les différents plans d'eau. On retrouve des études du même genre, l'une en Guyane Britannique pour un barrage et le réseau d'irrigation qui lui correspond, l'autre pour la Grande-Bretagne. Mais ces évaluations sont encore bien sommaires et leur méthodologie demande une sérieuse amélioration. Heureusement, dans beaucoup de cas plus simples, on peut avoir rapidement une idée du bilan général, comme on va le voir ci-après.

Une série de rapports présente enfin les résultats heureux d'une politique bien comprise d'aménagement de barrages, tenant compte de toutes les conséquences sur l'environnement: deux d'entre eux concernent un certain nombre d'ouvrages français (Serre-Ponçon, Ste-Croix, Bort-les-Orgues, Roselend, etc.) et l'aménagement du Verdon, un autre la Laponie, le quatrième et le cinquième l'Espagne, le sixième et le septième l'Autriche et le dernier la Tennessee Valley Authority. Certains d'entre eux présentent le caractère d'un plaidoyer, mais si mal intentionnés que puissent être certains lecteurs vis-à-vis des barrages, il n'est pas possible de contester le bilan nettement bénéfique d'un bon nombre d'entre eux à la lecture de ces rapports.

Il nous est difficile de présenter ici plus que ce résumé très imparfait des comptes rendus de ces deux réunions. Dans ce qui suit, nous aurons l'occasion d'utiliser certains compléments qui en seront extraits.

2. — BILAN DES COMMUNICATIONS PRÉSENTÉES AUX TREIZIÈMES JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE

Les Treizièmes Journées de l'Hydraulique débordent du sujet des deux réunions dont nous venons de parler, surtout en ce qui concerne les questions I, II et VI; mais la question V, couvre un sujet beaucoup plus restreint.

Il avait été prévu, en effet, de ne traiter que les points suivants:

— influence des grands réservoirs sur les brouillards et la nébulosité, l'évapotranspiration, les nappes souterraines, la qualité et la température de l'eau, la flore et la faune, la production piscicole,

— influence des canaux artificiels sur le niveau des nappes souterraines, la qualité et la tempé-

rature de l'eau, le potentiel biologique des cours d'eau alimentés par les canaux,

— influence des éclusées sur le lit des cours d'eau et les réactions de la faune et de la flore,

— influence des grands travaux maritimes sur le climat et l'environnement.

Les communications reçues, au nombre de neuf, ne concernent qu'une partie de la liste ci-dessus.

— Deux d'entre elles peuvent être rattachées à l'influence des grands réservoirs sur les brouillards et la nébulosité.

— Trois sur l'influence des grands réservoirs et des canaux artificiels sur les nappes souterraines.

— Une sur l'influence des aménagements hydrauliques sur la température de l'eau.

— Deux sur l'influence des réservoirs sur la flore, la faune et la production piscicole.

— Une sur l'influence des grands travaux maritimes sur l'environnement.

Cet ensemble est assez incomplet, mais la plupart des spécialistes susceptibles de présenter des communications intéressantes et originales sur ce sujet sont surchargés de travail et nous ne saurions trop remercier ceux d'entre eux qui ont pu distraire quelque temps d'un programme de travail trop lourd, pour nous présenter les résultats les plus intéressants de leurs travaux.

Nous présenterons ces rapports ci-après avec de légers compléments pour les parties du programme qui n'auraient pas été traitées par les auteurs.

3. — INFLUENCE DES GRANDS AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES SUR LA FORMATION DES BROUILLARDS, LA NÉBULOSITÉ, LE RÉGIME DES VENTS ET L'ÉVAPORATION

La formation de brouillards sur les plans d'eau résulte de la température et de l'humidité de l'air, de la température superficielle de l'eau et de sa salinité. La température superficielle de l'eau aux divers moments de la journée et même dans une moindre mesure aux diverses époques de l'année, est liée à l'inertie de la masse d'eau, c'est-à-dire aux dimensions de la réserve dans le cas de la retenue d'un barrage. Bien entendu, s'il s'agit d'un plan d'eau recevant les rejets d'une centrale thermique ou nucléaire, la quantité de chaleur apportée à ce plan d'eau intervient, mais nous sommes là dans le domaine de la question VI.

La dispersion du brouillard fait intervenir sur-

tout les caractéristiques géométriques de la retenue et le vent.

Dans le rapport de G. Tschirhart intitulé « Formation de brouillards sur les retenues de barrage et sur les sites de centrales thermiques », l'auteur expose d'abord les conditions de formation du brouillard d'évaporation. Elles résultent pour une salinité donnée de la température et de la teneur en vapeur d'eau de l'air (Point représentatif A) d'une part, et, d'autre part, de la valeur de la température de l'eau par rapport à celle du point critique déterminé sur la courbe de saturation de la vapeur d'eau (il correspond à la température du point C où la droite menée de A « tangente » la courbe de saturation). Si la température de l'eau est supérieure à la température correspondant à ce point, il y a formation de brouillard. Ceci suppose que la pellicule d'air au contact immédiat avec le plan d'eau est à la même température que celui-ci et saturée de vapeur d'eau. Le point critique est le même pour du brouillard en voie de formation que pour du brouillard en voie de disparition. L'auteur précise dans son rapport la diminution pour une température donnée de la densité de la vapeur d'eau saturante pour une salinité de 35 g de chlorure de sodium par kg de solution. Pour 20°, cette diminution est de 0,23 g/m³; les courbes pour l'eau douce et pour l'eau de mer sont donc très voisines.

En ce qui concerne la dispersion du brouillard, il y a très peu de recherches expérimentales systématiques, mais quelques modèles de calculs théoriques ont été élaborés; l'auteur présente deux de ces modèles mis au point en U.R.S.S., ceux de M.P. Timofeev et de M.E. Berlyand et R.I. Onikoul.

Le premier modèle considère les transformations thermodynamiques subies par une masse d'air d'origine continentale se déplaçant sur une surface d'eau pratiquement infinie. Timofeev n'étudie le phénomène que dans un plan vertical; il part des équations de l'échange turbulent appliqué aux paramètres température T et humidité spécifique S et des équations des profils verticaux du coefficient de turbulence K et de la vitesse du vent u . Le modèle présente quelques imperfections (hypothèses de base discutables: T_a et S_a constants avec l'altitude, stationnarité des processus météorologiques). La mise en application pratique est assez difficile, certains paramètres étant assez difficiles à estimer, mais il est simple et il serait intéressant d'en apprécier l'efficacité par de nombreuses vérifications expérimentales.

Le second modèle étudie les conditions de formation et de dispersion spatiale du brouillard à la traversée d'un plan d'eau de largeur l . Le calcul est fait également pour un plan vertical ZOx. On utilise l'équation de l'échange turbulent et l'équation du bilan radiatif appliquée à la partie

J. A. RODIER V. R.G.

de la terre située sous le vent de la nappe d'eau. Les auteurs du modèle sont conduits à adopter une méthode de résolution numérique par différences finies. M. Tschirhart donne deux exemples d'applications pratiques. Il conclut sur la formation du brouillard en souhaitant que l'on vérifie certaines hypothèses de base (égalité entre température de l'eau superficielle et la pellicule d'eau en contact ? Influence du vent et de sa turbulence sur la formation du brouillard, préciser l'influence de la salinité).

Les modèles présentés paraissent bien incomplets et auraient bien besoin de vérifications. Des études expérimentales sont en cours en France en vue de la mise au point d'un modèle efficace pour définir l'importance et l'évolution du brouillard. Il en résulterait des critères de prévision, de formation et d'évolution et on pourrait déterminer les caractéristiques climatologiques locales relatives à ces phénomènes.

Au Congrès de Knoxville, Y.J. Tsai et D.R. Delaporte avaient également présenté un modèle de formation et de dispersion de brouillard, modèle qui avait fait l'objet de vérifications expérimentales. Nous signalons qu'à Madrid le rapport de B. Rodhe (Suède), sur les effets de la régularisation d'un lac sur le climat local paraît assez complet; il y a une étude de l'effet de la régularisation du lac sur la fréquence des brouillards qui perd malheureusement un peu de son intérêt du fait que le lac est pris par la glace une bonne partie de l'hiver, de sorte que les résultats ne sont applicables que partiellement à nos plans d'eau français.

L'influence d'un grand plan d'eau sur le régime des vents a été étudiée par M.H. Gland dans son rapport intitulé « Effets mésométéorologiques des plans d'eau. Application au régime des vents à Fos ». Le principe qui gouverne en général les brises côtières est simple : la grande chaleur spécifique de l'eau conduit à des élévations ou à des diminutions de température beaucoup moins rapides que pour le sol. En outre, dans l'eau, le mélange turbulent constamment entretenu par le vent et les vagues provoque un transfert rapide de l'énergie reçue vers le fond du lac ou du réservoir. Pour le sol, seule la couche superficielle s'échauffe sensiblement. Il y a donc une discontinuité thermique à la limite de l'eau et du sol. En été, la température du sol est plus chaude que celle de l'eau pendant le jour et plus froide pendant la nuit. Le gradient de densité et de pression qui en résulte donne lieu dans les basses couches de l'atmosphère à un flux d'air venant de la zone la plus froide vers la zone la plus chaude, avec retour dans les couches supérieures (brise de mer le jour, brise de terre la nuit).

Pour que ceci se réalise, il faut une insolation

suffisante et que les brises de terre et de mer ne soient pas masquées par des vents résultant de la circulation atmosphérique à grande échelle. Le phénomène est peu sensible pour des cours d'eau à l'état naturel, sauf sur les grands fleuves tropicaux, mais il apparaît si l'on crée un très grand plan d'eau en barrant le cours d'eau. La configuration de la côte, la nature du sol, le relief, le couvert végétal peuvent modifier ce schéma théorique. Les études expérimentales deviennent nombreuses depuis quelques années. En France, la région de Fos et l'étang de Berre ont été spécialement étudiés en vue de résoudre certains problèmes liés à la pollution atmosphérique.

Dans la région étudiée, l'alternance de brise de terre et de brise de mer s'observe durant les mois chauds de mai à septembre et surtout en juin et juillet. La brise de mer commence à s'établir vers le milieu de la matinée et atteint son plein développement vers 15 heures avec une vitesse maximale de 10 m/s, l'épaisseur du flux variant de 800 à 1 000 m. L'auteur donne une carte de la brise à différentes heures montrant sa pénétration progressive vers l'intérieur, ainsi qu'une coupe montrant la même progression et les variations de l'épaisseur du flux de 100 à 200 m à 8 heures du matin, à 800 m vers 12 heures au voisinage de la côte. Durant les mois les plus chauds, la brise de mer paraît pénétrer jusqu'à une quarantaine de kilomètres dans la basse-vallée du Rhône. En septembre, seule une bande côtière de quelques kilomètres est affectée par ce phénomène.

Au-dessus de ce flux, existe un courant de retour de vitesse beaucoup plus faible. Dans la soirée, la brise de mer diminue d'intensité d'abord vers la côte, et une nouvelle circulation s'organise au voisinage de la côte pour commencer, puis elle s'étend plus au nord, le vent étant de sens contraire à celui que l'on observe dans la journée : c'est la brise de terre qui dure toute la nuit avec des vitesses beaucoup plus faibles que la précédente : 2 à 4 m/s; elle dure jusqu'aux premières heures de la matinée et le cycle recommence.

L'auteur étudie la durée et la distance de pénétration de la brise de mer en fonction de la durée d'insolation, donc de l'avancement de la saison : 3 heures en mars et octobre à Istres, 11 heures en juin et juillet. La brise de terre ne se manifeste vraiment que vers minuit en été alors que la brise de mer a cessé à 20 h 30.

Il est à noter que dès que la brise a pris une certaine ampleur, elle n'est plus perpendiculaire à la ligne du rivage, l'accélération de Coriolis la fait dévier vers la droite. Des effets thermiques locaux apportent des perturbations. A Istres, la brise de mer souffle du sud par exemple alors qu'à Marignane, elle souffle du sud-ouest.

En général, les grandes retenues sont de dimensions inférieures à celles de l'Étang de Berre, on

peut s'attendre à des phénomènes comparables, mais d'ampleur beaucoup moins considérable. De telles modifications pourraient avoir des répercussions importantes dans le domaine de la pollution. Il est recommandé de procéder à des études météorologiques du site avant aménagement, mais il est à craindre que les moyens nécessaires pour ces études et leur coût ne rebutent les constructeurs. D'autre part, il semble qu'on soit encore loin de l'utilisation de modèles permettant de prévoir quelle sera exactement la situation après aménagement.

L'influence de l'aménagement des retenues sur l'évaporation n'a guère tenté les auteurs et il faut reconnaître qu'en France il est assez difficile d'établir un bilan global. C'est plus facile en région semi-aride.

Supposons un grand réservoir destiné à l'irrigation. Par rapport à la situation initiale, le volume d'eau en réserve va s'évaporer en partie; par contre, les pluies reçues par le plan d'eau seront récupérées à 100 % au lieu de 5 à 30 % en général, avant la construction de l'ouvrage; il y aura donc une certaine lame d'eau à retrancher des pertes brutes par évaporation pour obtenir la perte nette. Par exemple, au niveau du lac Tchad, la perte nette par évaporation correspond, sur une retenue de plusieurs milliers de km² de surface, à très sensiblement 2 m. Sur le réservoir de Kossou en Côte-d'Ivoire, au nord de la limite de la forêt tropicale, cette perte nette n'est plus que de 350 mm.

Il faut ajouter à cela l'évaporation dans les zones irriguées qui est égale à l'évapotranspiration potentielle alors que l'évapotranspiration réelle est très réduite en saison sèche.

Un rapport de P. Dubreuil et G. Girard « Influence de très nombreux petits réservoirs sur le module annuel d'une rivière tropicale » a été présenté à Knoxville sur ce sujet. Il concerne un bassin situé au Brésil comportant plusieurs milliers de petits réservoirs, plusieurs centaines d'ouvrages de plus de 1 million de m³ et deux retenues de plus de 1 milliard de m³. Les auteurs n'ont considéré qu'une partie du bassin : 2 000 km² contrôlés à 60 % par des réservoirs. On a reconstitué les modules naturels sans réservoirs. Avec réservoirs, la distribution des modules est encore plus dissymétrique que sans réservoirs. En 1965, par exemple, les réservoirs avaient réduit de 10 % le module moyen interannuel et de 25 % le module de récurrence quinquennal sec. Avec un tel nombre de réservoirs non interannuels, on arrive à ce résultat paradoxal d'une impression d'aridité supérieure à la situation antérieure. Nous n'en sommes pas là en France, mais il n'empêche que la multiplication de petits réservoirs peut conduire à des

majorations sensibles des pertes par évaporation et à une diminution très sensible des modules en année sèche.

4. — INFLUENCE DE L'AMÉNAGEMENT DES GRANDS RÉSERVOIRS ET DES CANAUX ARTIFICIELS SUR LES NAPPES SOUTERRAINES

Cette partie du programme a été traitée de façon très complète grâce aux trois communications suivantes :

— E. Morenon, A. Scherrer, P. Ruby et G. Bossy.

Chute de Golfech sur la Garonne, moyens mis en œuvre pour éviter les répercussions de l'aménagement sur la nappe fluviale.

— L. Reynaud, P. Vincent-Beaume, P. Ruby et G. Bossy.

L'aménagement hydraulique de la Durance et la nappe alluviale à l'aval de Mallemort.

— P. Savey et R. Ponnelle.

L'influence de l'aménagement du Rhône sur les nappes souterraines.

Le premier rapport passe en revue tous les problèmes que pose l'aménagement classique d'un grand fleuve en plaine, présente les solutions adoptées et donne les résultats obtenus.

Les auteurs des second et troisième rapports qui concernent de très gros aménagements ont cherché à ne mettre en évidence qu'un ou deux problèmes parmi les plus importants.

La chute de Golfech est aménagée grâce à un barrage mobile de 10 m de haut créant une retenue nécessitant la mise en place de 16 km de digue d'encagement. Un canal d'amenée de 10,6 km de long conduit les eaux à la Centrale qui les restitue à la Garonne par un canal de fuite de 2 km de long non revêtu.

Il s'agissait :

1°) de ne pas perturber les niveaux de la nappe alluviale le long du canal d'amenée et au voisinage de la Centrale pendant les travaux et après leur réalisation;

2°) d'éviter de faire remonter la nappe, le long de la retenue;

3°) d'éviter que le canal de fuite ne draine les eaux souterraines.

Les auteurs donnent une description, courte mais complète, de la partie de la nappe de la rive droite de la Garonne intéressée par l'aménage-

J. A. RODIER | V. R.G.

ment. Puis ils présentent le mode de réalisation du canal qui a nécessité des pompages continus dans les rigoles de fond de fouille poursuivis par des pompages dans le dispositif définitif des drains du canal jusqu'à la mise en eau. Ces pompages ont duré 2 ans et demi. Entre temps, il était nécessaire de réalimenter la nappe dont le débit était à l'état naturel de 200 l/s pour un front de 10 km.

Après une série d'études comportant la recherche des zones à bonne perméabilité, des essais d'injections, la réalisation d'une fosse d'injection expérimentale, la mise au point d'un modèle rhéoelectrique pour déterminer le nombre, la position et le débit des centres de réinjections, l'élaboration d'un modèle mathématique pour améliorer la connaissance des transmissivités et les variations dans le temps, on a mis au point le dispositif définitif comportant 7 fosses à injection le long du canal projeté, correspondant à un débit total de 250 l/s.

Les conditions à remplir étaient les suivantes : plus grande surface de contact possible, plus grande charge possible et éviter tout risque de colmatage. Chaque Centre comportait deux bassins ceinturés d'un remblai de 2 m de haut, un bassin pouvant être nettoyé pendant que l'autre fonctionnait. Quatre puits de 1 m de diamètre étaient forés dans chaque bassin. Le fond de la fosse était garni de graviers sur 1 m, avec une couverture de 0,30 m de sable fin. L'eau prélevée par pompage dans le canal latéral de la Garonne était envoyée dans les bassins par des pompes de reprise. Les débits pompés étaient contrôlés et le niveau de la nappe était suivi en 10 points de contrôle.

L'alimentation artificielle a duré deux ans et demi; il n'a pas été nécessaire d'injecter plus de 185 l/s en pointe et il a suffi de nettoyer les bassins une fois tous les deux mois. Le coût total de la réalimentation a été de 1 450 000 Francs pour 7 700 000 m³. Le contrôle de la nappe fait toutes les semaines a montré que les cotes se maintenaient au voisinage des cotes observées avant les travaux. Aucune réclamation n'a été enregistrée pendant toute la période du rabattement.

Pour la retenue établie, à l'aval, entre des digues d'encagement, on a aménagé un contre-canal pour éviter des remontées préjudiciables de la nappe; le radier de ces canaux avait été prévu autant que possible au contact des alluvions grossières. Dans les cas où cela n'était pas possible, on a aménagé des puits drainant. L'eau est évacuée dans la retenue par trois stations de pompage pour le contre-canal rive droite.

Le radier du canal d'amenée a été prévu à une cote telle qu'il laissait en dessous la possibilité pour la nappe de transiter vers la Garonne.

Les auteurs décrivent le système de drainage prévu sous le radier du canal d'amenée et toutes les précautions prises pour qu'il ne perturbe en rien le régime des eaux souterraines.

Le canal de fuite a été pourvu d'un écran d'étanchéité sur sa rive droite pour éviter le rabattement de la nappe.

Un certain nombre de seuils en palplanches installés dans la rivière maintiennent une ligne d'eau correspondant à une cote nettement supérieure à celle de l'étiage à l'état naturel; la nappe alluviale à l'étiage se trouve donc surélevée, ce qui est très profitable aux cultures

Cet ensemble de mesures a assuré la sauvegarde de cultures importantes s'étendant sur 4 500 ha.

Le rapport suivant, sur l'aménagement hydroélectrique de la Durance et la nappe alluviale à l'aval de Mallemort, ne considère qu'un seul aspect des questions examinées plus haut : le maintien du régime de la nappe alluviale de la Basse-Durance, après dérivation d'une partie importante des eaux de cette rivière vers l'étang de Berre. L'aménagement de la Durance intéresse une zone où 75 000 ha sont irrigués, le débit total requis par les irrigations atteignant au maximum 114 m³/s.

L'importance économique de cette région a nécessité une étude très approfondie des dispositifs destinés à éviter toute influence préjudiciable des aménagements hydroélectriques sur le régime de la nappe.

La communication ne concerne que l'influence de la dérivation des eaux vers l'étang de Berre et les mesures prises en conséquence.

Dès 1946, Electricité de France a procédé à l'étude générale de la nappe alluviale et à cet effet a examiné :

— les variations de son niveau (1 800 points de mesure avec 150 enregistreurs) et l'influence des facteurs principaux : irrigation, crues et pluies, sur ces variations. Ceci a permis de définir l'état de référence;

— les possibilités de réalimentation par des essais effectués entre 1953 et 1957 dans les 5 bassins successifs que comporte la plaine alluviale; chaque bassin est rempli de dépôts alluviaux, il est séparé du suivant et du précédent par des resserrlements dus au relief.

Partout dans ces bassins, la cote de la nappe est supérieure à celle de la rivière, sa pente diminuant au voisinage du resserrement aval. A l'amont des bassins, la rivière alimente la nappe et c'est là qu'ont été implantés les centres de réalimentation.

La nappe, au plus bas en janvier-février, remonte jusqu'au mois d'août grâce aux irriga-

tions. Les crues de la Durance donnent lieu à de brusques remontées.

Pour déterminer l'influence qualitative de la dérivation de la rivière à Mallemort, sur les cinq bassins on a évalué d'abord le débit moyen annuel des alimentations V :

$$V = B + I + R + P$$

B débit provenant du bassin amont, I infiltration des irrigations, R débit provenant de l'écoulement superficiel de la rivière, P pluies.

On calcule $V - B = I + R + P$ pour chacun des bassins. On arrive à un total de 135 000 000 m³/an pour les 5 bassins à l'état naturel.

L'ordre de grandeur du déficit dû à la dérivation de la Durance a été calculé de deux façons :

— après application de la loi de Darcy sur un profil en travers au centre du bassin; en admettant un affaissement de 0,50 m de la nappe et une réduction de la pente de 5 %, on peut estimer le déficit à 7,5 %, soit 10 000 000 m³;

— la comparaison de la nappe entre le 15 janvier 1967 après dérivation de la rivière et le 15 janvier 1966 avant dérivation, montre qu'en supposant une porosité efficace de 10 % pour un volume de terrain vidangé de 160 000 000 m³, le déficit est de 16 000 000 m³. Cette valeur a été confirmée par les deux campagnes 1969-1970, 1970-1971. Il s'agit donc de restituer 15 000 000 m³ à la nappe.

Ce volume n'est pas modulé, en principe. L'injection se fait pendant 7 à 8 mois, le 1^{er} septembre au plus tard.

Les huit centres de réalimentation artificielle ont été définis en conséquence. Trois autres sont conservés en secours pour le cas de défaillance. Ces centres ont été situés près des zones de réalimentation naturelle et sont constitués parfois par des souilles naturelles ou aménagées dans le lit majeur de la Durance. Les souilles du plan d'Orgon aménagées à l'occasion de la construction de l'Autoroute A 7, ont 400 m de côté, 6 m de profondeur moyenne. Le premier bassin a été vite colmaté et transformé en bassin de décantation; il a été pourvu d'une batterie de 4 siphons pour alimenter la souille voisine.

Enfin, Electricité de France utilise certains des centres expérimentaux aménagés en 1956.

Les auteurs donnent les volumes réinjectés en 1969-1970 et 1970-1971; on retrouve les 15 000 000 m³ cités plus haut et les niveaux de la nappe en fin d'injection (31 décembre) sont les mêmes que ceux de 1956.

Le rapport énumère les difficultés rencontrées : alimentation de certains centres par des canaux faisant déjà l'objet de prélèvements pour l'irriga-

tion ou mis en chômage au mauvais moment, colmatage des prises d'eau et des puits d'injection par des détritiques de toute nature, sabotage des tubes d'injection, gel, turbidité des eaux.

On y remédie dans les centres définitifs, en particulier pour ceux de Cavaillon et de Cheval Blanc :

- par des bassins de décantation dont on chasse les boues à la lance d'incendie pendant la période de chômage des canaux et en fin de période d'injection, mais il faudra peut-être installer des ponts racleurs,
- par des filtres à tambour rotatif protégés par des grilles grossières,
- par un nouveau canal d'alimentation pour le centre IV,
- les nouveaux puits d'injection sont réalisés par des tubes crépinés de 330 mm de diamètre dans des forages de 800 mm avec graviers dans l'espace annulaire.

Pour un centre-type capable de 200 l/s maximum, les frais d'investissement se montent à environ 1 000 000 F (base juin 1973) soit 0,60 F/m³/an.

Pour l'exploitation, on compte 0,02 F/m³/an.

Le troisième rapport, qui concerne les grands aménagements de la Compagnie Nationale du Rhône, ne présente comme le précédent que les problèmes les plus intéressants rencontrés par les ingénieurs lorsqu'ils se sont efforcés de maintenir la nappe alluviale du Rhône dans son état initial, ou même d'améliorer les conditions naturelles. La zone intéressée par la nappe s'étend en effet sur 100 000 ha de cultures et il s'y trouve un certain nombre de captages alimentant en eau des villes ou des centres industriels importants.

Dans ce cas, il s'agit le plus fréquemment du problème inverse de celui traité dans le rapport précédent : les retenues et les canaux d'aménage dont les plans d'eau sont situés presque toujours au-dessus de la plaine risquent de conduire à une surélévation dommageable de la nappe; en outre, les travaux recoupent cette nappe et risqueraient d'empêcher son écoulement normal si aucune précaution n'était prise. On y remédie par des contre-canaux, la CNR en a aménagés plus de 200 km.

Ces contre-canaux, en recoupant l'horizon perméable collectent et évacuent les eaux d'infiltration provenant des retenues et des canaux, et également de la nappe; la cote dans ces contre-canaux, et par conséquent le niveau de la nappe, est réglée par des seuils successifs. Les auteurs montrent, d'après l'exemple de l'aménagement de St-Vallier que, malgré la forte perméabilité des alluvions recoupées par les contre-canaux, le débit dans ceux-ci finit par se stabiliser à une valeur

J. A. RODIER | V. R.G.

acceptable grâce au colmatage du fond et des berges des canaux et des retenues par les alluvions fines. La mise en eau des canaux se fait d'ailleurs par paliers successifs de 0,50 m à 1 m chacun durant 4 à 5 semaines. Pendant cette mise en eau, on exerce un contrôle serré des piézomètres et des débits dans les contre-canaux. La figure 1 du rapport, qui concerne la période octobre 1971 à juin 1972, montre parfaitement l'action des divers facteurs sur le débit des contre-canaux : colmatage et variation de la température, donc de la viscosité de l'eau. L'effet d'une crue du Rhône, avec des eaux plus chargées que pendant la période précédente, est immédiat sur le colmatage.

Le graphique des variations des niveaux piézométriques dans les talus des digues côté contre-canal est également très convaincant. C'est grâce à ce colmatage qu'on peut procéder à des éclusées sans nuire à la stabilité des talus. On verra plus loin que l'aménagement de contre-canaux n'est pas toujours suffisant et qu'il faut parfois les compléter par des forages de décompression profonds.

Dans la résolution de ces problèmes, on se heurte à l'anisotropie du remplissage alluvial dont un exemple frappant est donné au voisinage de la ville de St-Vallier. Les auteurs ont constaté, par les observations piézométriques, sur la rive gauche du Rhône, où aucun contre-canal n'avait été aménagé, que le contre-canal rive droite draine la rive gauche; les eaux souterraines passent sous le Rhône, un niveau perméable continu de graviers crus mettant en communication les deux rives; la nappe se conduit comme une nappe « captive » vis-à-vis de niveaux moins perméables situés au-dessus. Le rapport montre enfin l'efficacité de forages de décompression profonds effectués dans la plaine de Boulbon. Dans cette plaine, autrefois inondée, la nappe a atteint la cote du sol en automne 1972. On a, d'une part, détourné le ruissellement des flancs de la vallée et, d'autre part, aménagé 10 forages de décompression dans un fossé profond raccordé au contre-canal; le débit évacué par ces forages varie entre 150 et 190 l/s; la nappe se maintient maintenant à 1 m en dessous du niveau de l'année précédente.

Complétés parfois par des forages de décompression profonds, les contre-canaux indispensables pour évacuer les eaux du ruissellement superficiel constituent le moyen le plus économique de réglage de la nappe.

Ces trois exemples montrent que maintenant les ingénieurs disposent d'une technique bien au point pour résoudre les problèmes posés par l'influence des aménagements sur les nappes. Mais comme pour presque tout ce qui concerne la question V, il faut une étude approfondie de la situation des nappes avant les travaux, une bonne

prévision de ce qui se passera pendant et après et un contrôle très serré des divers phénomènes mis en jeu au cours de la construction et en exploitation.

5. — INFLUENCE DES GRANDS AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES SUR LA QUALITÉ ET LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

Les problèmes de la qualité des eaux sont surtout traités dans la question VI et, en particulier, l'eutrophisation. Nous ne devons considérer ici que les questions liées aux problèmes de température. Le régime thermique des lacs et réservoirs n'intervient qu'indirectement pour expliquer les différences de température entre un parcours naturel et un parcours traversant un réservoir. Signalons qu'à Knoxville et surtout à Madrid quelques rapports intéressants avaient été présentés sur le régime thermique des réservoirs, en particulier un rapport sur le comportement du réservoir Seine, pour lequel un modèle de simulation a été mis au point avec succès à partir des températures du Bourget.

Dans la communication de M. A. Marazio, P. Penta, M. Tonini et G. Rossi « Variations thermiques du régime naturel des fleuves dues à l'influence d'aménagement pour l'exploitation des eaux », les auteurs considèrent les modifications de température des eaux en relation avec le parcours artificiel qu'on les astreint à suivre. Les résultats des premières campagnes d'orientation et de mesures donnent déjà quelques confirmations de ce que peut indiquer un raisonnement théorique.

Dans les cours d'eau naturels, la dissipation d'énergie sous forme de chaleur conduit à une élévation de température trop faible pour être significative : 0,2 °C pour une chute de 100 m; mais ce qui est plus important ce sont les échanges avec le milieu extérieur : par la surface de l'eau et dans une beaucoup plus faible mesure par le fond de la rivière. Les échanges qui se font surtout par rayonnement sont très importants; au fur et à mesure que le cours d'eau perd de l'altitude, la température moyenne de l'atmosphère augmente, d'où un accroissement de la température de l'eau, dans une plus faible mesure que celui de l'air.

Dans les lacs profonds, la température constante dans le fond varie en surface avec la saison. La température de l'eau à la sortie d'un lac naturel est toujours supérieure à celle des tributaires de ce lac.

Les auteurs examinent alors le cas des divers ouvrages : dans un canal d'aménée à air libre, les échanges étant moins importants que dans la rivière (moins de turbulence, altitude plus élevée), la température de l'eau à la restitution est inférieure à celle de la même eau qui aurait suivi un parcours naturel.

En galerie, si le parcours n'est pas trop long, la température est du même ordre de grandeur à l'entrée qu'à la sortie.

Dans les réservoirs artificiels, l'eau prélevée à une cote assez basse est plus froide qu'en surface. S'il s'agit d'un réservoir pour l'irrigation, l'eau étant restituée en plein été, elle a été réchauffée dans le réservoir et elle en sort à une température supérieure à celle qu'elle aurait s'il n'y avait pas de réservoirs.

S'il s'agit de réservoirs pour production d'énergie hydroélectrique, elle est soutirée en plein hiver; dans le réservoir elle a eu le temps de se réchauffer, puis de se refroidir, la température est du même ordre de grandeur qu'à l'arrivée dans le réservoir.

Les auteurs ont étudié deux bassins :

- Le Sarga (BV = 1 050 km²) où trois centrales hydroélectriques ont été aménagées depuis les sources avec trois réservoirs : le lac de Molverno au pied de la centrale amont, et les lacs de Tolline et de Covedine à l'aval de la seconde. La troisième centrale restitue ses eaux au lac de Garde,
- le Boite (BV = 360 km²) sans aménagement jusqu'à 40 km de sa source.

Des observations préliminaires ont été faites en 1972 sur le Sarca lors de l'arrêt des centrales; on a donc pu contrôler le régime thermique pour le cours d'eau à l'état naturel. A la suite de ces premiers résultats, un réseau de mesures a été installé sur le cours d'eau naturel et sur les parcours artificiels : 12 postes d'enregistrement et 2 stations climatologiques complètes. Des profils de température sont observés sur le lac Molverno et des campagnes de mesures sont effectuées régulièrement sur le lac de Garde. On a complété ces dernières mesures par des profils de température à l'embouchure du Sarca pour suivre le trajet des eaux de ce cours d'eau à l'arrivée dans le lac. Des campagnes de mesures sont en cours sur le Boite.

Les premières séries de mesures ont confirmé que dans les parcours artificiels (canaux et galeries) l'eau s'échauffe moins que dans le lit naturel, mais cette influence est annulée par le séjour dans les lacs de Covedine et de Tolline, où les eaux ont le temps de se réchauffer; aussi la température est en définitive la même à l'issue des deux parcours : naturels et aménagés.

Le rapport donne quelques indications sur le régime thermique du lac de Garde. Les eaux du Sarca à l'arrivée dans ce lac plongent pour rejoindre les couches de même température.

Les températures de l'eau du Boite suivent fidèlement celle de l'air et augmentent lorsque l'altitude décroît, les maximums et minimums étant décalés par rapport à ceux de la température de l'air.

Il s'agit d'une première interprétation qualitative, mais l'analyse systématique des résultats des réseaux permettra une interprétation quantitative des phénomènes; en tous cas, on a déjà pu constater que le phénomène était assez complexe par suite du comportement différent suivant le type d'ouvrage et son mode d'exploitation.

6. — INFLUENCE DES GRANDS TRAVAUX HYDRAULIQUES SUR LA FLORE ET LA FAUNE AQUATIQUES ET LA PRODUCTION PISCICOLE

On devrait considérer sous ce titre deux ensembles de problèmes : ceux relatifs à la création de réserves et ceux liés aux perturbations apportées au régime naturel des eaux, à l'aval, par les éclusées.

Le second sujet tente assez peu les spécialistes; on en a assez peu parlé à Knoxville et au Congrès des Grands Barrages. Un seul rapport de G. W. Begg sur les conséquences biologiques des éclusées à l'amont et à l'aval de Kariba traite ce problème, mais il s'agit d'un cas extrême, les débits lâchés au barrage étant très élevés et l'auteur s'est intéressé surtout aux dommages résultant de ces très fortes éclusées sur la faune vivante dans le lit majeur. Ce qui apparaît comme très important est la profondeur à laquelle l'eau est puisée dans ce réservoir, ce qui influe aussi bien sur la température des eaux éclusées que sur leur composition chimique avec des conséquences diverses sur la vie aquatique. On insiste également sur la concentration des poissons, en basses eaux, immédiatement à l'aval des ouvrages et la mortalité élevée que l'on constate dans ces zones au moment de l'ouverture des vannes des barrages. Disons simplement que la vie de la faune aquatique est perturbée non seulement à l'aval des barrages, mais aussi à l'amont quoique dans une moindre proportion.

J. A. RODIER | V. R.G.

Les deux communications, ci-après, concernent le premier point :

— J. Verneaux et J.P. Vergon.

« Incidences du marnage sur le benthos d'un lac artificiel (retenue de Vouglans - Jura) ».

— B. H. Dussart.

« Flore, faune et utilisation des grands réservoirs ».

Comme il est dit dans le second rapport, « les grands réservoirs sont des œuvres humaines à composantes naturelles et non des œuvres naturelles sans composantes humaines ». La flore et la faune spécifiques aux grands réservoirs artificiels sont différentes de celles des lacs naturels, mais il convient de leur permettre de se développer et ce développement devrait être tel que, pour l'homme, la rentabilité de l'ensemble soit optimale. La faune doit pouvoir se nourrir et se reproduire et pour ces deux fonctions, elle rencontre de graves difficultés du fait du marnage très important dans un bon nombre de réservoirs artificiels.

Le premier rapport s'intéresse aux conséquences du marnage de 34 m du réservoir de Vouglans sur la vie du benthos : microfaune vivant sur le fond des lacs qui constitue avec le plancton une des bases de la nourriture de nombreux poissons. Après quelques indications sur la retenue de Vouglans qui couvre au maximum 1 600 ha, les auteurs précisent les caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac prélevées aux différentes profondeurs à quatre stations implantées le long de la retenue. Ils ont retenu les données moyennes relevées en surface de juin à septembre, de 1971 à 1973 pour une station à l'arrivée de l'Ain dans le lac et une station à l'amont du barrage. Ces caractéristiques physico-chimiques correspondent à de fortes productivités biologiques. Les eaux de l'Ain arrivant dans la retenue peuvent se situer entre le cinquième et le sixième niveau de la structure typologique, avec des populations aquatiques qui devraient être à la fois riches et diversifiées. Encore faudrait-il qu'arrivant dans le lac ces eaux rencontrent des conditions telles que les premiers maillons de la chaîne alimentaire puissent s'y développer, ce qui n'est pas tout à fait le cas.

Les auteurs ont étudié les peuplements benthiques littoraux (les peuplements planctoniques et ichtyologiques ne sont pas étudiés dans ce rapport; bien qu'ils soient observés dans l'étude écologique complète de ce lac commencée en mai 1971).

Quelques détails sont donnés sur les techniques de prélèvements (sondes à main, filets, benne Eckman, pièges à imagos); les auteurs ne parais-

sant pas absolument satisfaits de l'appareillage à leur disposition. Les supports prospectés classés de H1 à H8 comprennent des dépôts de diverses natures grossiers ou fins, superficiels ou semi-profonds, H3, des débris ligneux et souches flottantes (H6 et H7) et une des rares rose-lières survivantes H8; pas de supports végétaux flottants, ils sont très rares.

Les analyses faunistiques sont présentées dans un grand tableau où pour les trois années 1971-1972-1973, les abondances sont présentées pour une soixantaine d'espèces d'invertébrés. Il y a cinq classes d'abondance de 1 à 5 ($S = 500$ individus pour 1 m^2 ou 4 dm^3).

Comme il a été observé ailleurs, l'abondance et la diversité du benthos sont très réduites ou nulles lors du remplissage de la retenue. Seule la période de stabilité des niveaux de Juillet-Août permet le développement des invertébrés. Si cette période se prolonge comme en 1973 la diversité s'accroît.

De façon générale, le stock benthique initial décroît rapidement pour tous les habitats soumis directement aux variations de niveau, ceci s'aggrave encore lorsque la zone de marnage est sujette à l'érosion. Certaines espèces s'adaptent en abandonnant ces habitats pour d'autres : par exemple, les bois flottants ou les sédiments fins profonds. Ces sédiments fins profonds en voie de constitution, les bois morts flottants dont le nombre diminue progressivement sont colonisés par certaines espèces, ce qui compense dans une certaine mesure la régression signalée plus haut dans d'autres habitats.

Les afférences latérales (affluents ou effluents traités) sont particulièrement intéressantes d'autant plus que certaines conservent des reliques de végétation aquatique donc un benthos relativement riche et diversifié; mais ceci ne présente qu'une surface très faible par rapport aux autres habitats où la régression est extrêmement importante.

Ces conclusions sont en rapport avec ce qui a été constaté sous d'autres climats; elles permettent de définir une première série d'aménagements favorisant le développement du benthos : fixation du sol des versants, épuration des effluents arrivant dans le lac, implantation de végétaux rivulaires (roseaux etc.) qui servent également d'abris et de frayères. Une seconde série d'aménagements résultera des études effectuées actuellement sur le plancton et les poissons eux-mêmes. Le rapport se termine par une note pas trop pessimiste : il existe des bases scientifiques (étude du lac d'Eguzon) et il n'est pas indispensable de connaître le détail des mécanismes des phénomènes pour proposer des solutions de remplacement.

Dans le second rapport, B. Dussart considère les problèmes de la flore, de la faune dans leur ensemble au point de vue utilitaire.

Les grands réservoirs, très jeunes à l'échelle des temps géologiques le sont souvent encore plus au point de vue écologique. « La colonisation d'un grand réservoir par la flore et la faune locales est en effet un phénomène dynamique dont l'importance et les conséquences sont souvent mal comprises. Chaque espèce à ses propres exigences, mais aussi sa propre capacité de multiplication, son propre temps de génération ». Si le cycle vital d'une espèce est au moins assuré deux fois, elle a toutes chances de subsister. Cela peut durer quelques jours pour certains organismes unicellulaires, mais il faut plusieurs années pour d'autres organismes. Le temps d'adaptation de la plupart des poissons est par exemple de 10 à 15 ans en régions tempérées maritimes. Ce sont les organismes les plus lents à se développer qui, s'ils sont présents, prouvent que le réseau alimentaire du réservoir peut servir de support aux autres espèces. Lorsque l'équilibre est atteint, l'évolution de la faune et de la flore dépend des fluctuations climatiques et également des nouvelles actions de l'homme.

Les plus importantes de celles-ci, on l'a vu plus haut, sont les fluctuations de niveau commandées. On estime que par rapport aux lacs naturels, celles-ci font disparaître les deux tiers des espèces préexistantes et, bien entendu, ce ne sont pas obligatoirement « les meilleurs qui restent » (cyanophytes du plancton et pestes d'eau de certains organismes végétaux).

L'auteur décrit l'évolution biologique d'un réservoir artificiel (plancton de type particulier et bactéries, puis chromophytes, certains rotifères et certaines larves d'insectes). La flore et la faune benthiques, on l'a vu plus haut, font ce qu'elles peuvent pour s'adapter au rythme des fluctuations de niveau qui ne coïncide pas toujours avec celui de ce qu'on pourrait appeler les saisons biologiques.

Quant au développement des poissons, il peut dans certains cas être favorisé par la disparition de prédateurs, quand une ponte est réussie. Mais beaucoup de poissons qui ne frayent que sur les fonds peu profonds ou dans la végétation s'accroissent très mal du marnage.

L'implantation et la multiplication de végétaux aquatiques sont donc très importantes pour la reproduction des poissons; ces végétaux n'ont souvent pas le temps ou la lumière suffisante, du fait du marnage, pour se développer normalement. La végétation palustre supporte mieux l'assèchement, la submersion que la végétation aquatique.

Ce sont ces plantes qui peuvent servir de support au benthos, d'abris aux jeunes poissons pour qu'ils soient plus résistants quand arrivera la période la plus défavorable du cycle. Les zones plates à l'amont du réservoir, l'arrivée des tributaires secondaires sont favorables à la colonisation par cette végétation des marais : phragmites, carex etc. Ces plantes doivent être protégées là où elles acceptent de s'implanter ou de survivre.

Les plantes flottantes, malgré de graves inconvénients ont pourtant un grand intérêt indirect, elles accroissent la surface biologiquement active et permettent le développement d'organismes qui servent de nourriture aux jeunes poissons. L'auteur cite le cas du grand lac du Cambodge où les pêcheurs immergent des fascines à l'étiage pour accroître cette surface active. Dans les lacs artificiels, les taillis submergés jouent le même rôle.

Il est essentiel que l'homme aménage la zone de marnage pour le développement de la flore et de la faune littorales et pélagiques. Ceci exige de la patience et du discernement.

De façon générale, on doit étudier un compromis qui permette aux groupements humains d'utiliser au mieux le milieu ainsi créé en veillant à ce que chaque type d'organisme garde sa place, soit de régulation soit de producteur d'une denrée plus ou moins utile pour l'homme.

L'auteur suggère à cet effet l'aménagement de petites réserves à l'amont du réservoir dans des diverticules, ces réserves admettant un niveau variable entre le niveau maximal et un niveau de 2 à 3 m plus bas, elles constitueraient des « greniers à vivre » et des « pouponnières à poissons » qui, à la remontée des eaux, rejoindraient le reste de la retenue. Il suggère également la construction de plates-formes flottantes refuges. Les berges devraient être aménagées de façon judicieuse, certaines parties seraient à protéger, d'autres à nettoyer pour le tourisme et la pêche.

En définitive, l'homme ne doit pas ignorer la faune et la flore qui peuvent peupler les réservoirs et il doit intégrer son action à l'ensemble de l'évolution biologique de ces réservoirs « sans chercher à imposer outre mesure son mode de vie et les dimensions de son environnement à l'ensemble ».

On est encore très loin dans ce domaine de la maîtrise avec laquelle on préserve les nappes phréatiques (voir plus haut); on est cependant frappé du caractère constructif de ces deux rapports et on voit qu'avec beaucoup de bonne volonté de la part des biologistes, comme des ingénieurs, on doit arriver dans bien des cas à des solutions acceptables par les deux parties.

J. A. RODIER | V. R.G.

7. — INFLUENCE DES GRANDS TRAVAUX MARITIMES SUR L'ENVIRONNEMENT

C'est là un sujet vaste et difficile. M. Pechère dans son rapport : « Influence des grands aménagements portuaires sur le milieu marin et l'hydrogéologie côtière » a recherché, parmi les études et réalisations en cours concernant les trois aménagements portuaires prioritaires de Dunkerque, Le Havre et Marseille-Fos, quelles étaient les recherches et dispositions des ouvrages les plus intéressantes pour le genre de problèmes liés à la question V ?

En ce qui concerne Dunkerque, un effort très important a été fait pour éviter l'envahissement de la nappe phréatique par l'eau de mer, les études correspondantes ont déjà fait l'objet de publications.

Pour le Havre-Antifer, le problème des dragages et de l'extraction de matériaux est un des plus préoccupants.

On prévoit d'exploiter intensivement dans la vallée sous-marine de la Seine les gisements d'agrégats marins pour les constructions de la région parisienne. Il peut en résulter des conséquences très importantes sur l'équilibre biologique du fond de la mer. C'est pourquoi le Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNE XO), avec l'aide des Organismes dont il coordonne l'activité (station de Roscoff, Centre océanologique de Bretagne (S.T.P.M.) CEA et LCHF) a été autorisé à creuser une souille expérimentale de 2 km de long au sud-ouest du Cap de la Hève. Les études portent sur la destruction du benthos et les atteintes à l'écologie, le risque de destruction des frayères, la turbidité et la sédimentation des parcelles fines rejetées à la mer, le surcreusement ou comblement de la souille après exploitation. La première campagne de dragage a eu lieu en janvier 1974. Pour le moment, on ne peut donner encore aucun résultat.

Le CNEXO étudie également les conséquences pour la pêche de la construction et de l'exploitation du Port du Havre-Antifer. Après examen des résultats des études sur la sédimentologie du site effectuées par le Laboratoire Central d'Hydraulique et le Commissariat à l'Energie Atomique, on procède actuellement à la mise au point du programme des études (Centre Océanologique de Bretagne).

L'aménagement de la zone industrielle de Fos a posé non seulement des problèmes de pollution atmosphérique (voir début de ce rapport), mais aussi des problèmes hydrogéologiques très importants. Cette zone a été implantée dans une

région marécageuse où le creusement des darses et le remblaiement des marais pouvaient perturber le régime de l'aquifère, du cailloutis de la Crau compris en général entre le grès miocène et une couche de limon d'une puissance variant du nord au sud de 0 à 20 m. Cet aquifère à l'état naturel, se vide assez difficilement vers la mer du fait de la couche de limon peu perméable et de la pression de l'eau de mer qui tend à créer un coin salé. Il avait été déjà nécessaire de drainer les limons à l'amont, avant tout aménagement; les remblaiements et apports de matériaux risquaient de provoquer une extension vers l'amont des résurgences et l'ouverture des darses risquait de faciliter l'invasion de l'aquifère par l'eau de mer, (ceci uniquement dans une zone limitée au nord de la darse 1).

On a aménagé une tranchée drainante dans la zone où une modification de l'état initial était à prévoir à la suite des travaux.

Cette tranchée a pour objet de :

- récupérer la majeure partie du débit naturel,
- éviter les variations de niveau piézométriques dans le remblai,
- maintenir une charge piézométrique suffisante pour éviter que le coin salé ne puisse remonter plus à l'amont.

Une vanne à niveau constant règle le niveau piézométrique moyen à +1,25 m NGF.

En outre, les travaux de fondation des établissements industriels doivent être faits avec précaution pour éviter tout rabattement de la nappe, ce qui aurait entraîné une remontée du coin salé.

Pour Solmer, on a remonté les ouvrages au maximum et les quelques rabattements locaux ont été réalisés par pointes filtrantes dans les sables superficiels ou dans des cuvettes étanches injectées chaque fois que les fondations devaient être réalisées dans la nappe de la Crau. Pour Ugine-Aciers, la situation était moins délicate et on a pu se contenter de rabattement par puits filtrants.

Les contrôles piézométriques effectués ont montré que l'ensemble des travaux n'avait pas eu d'incidence sur l'équilibre hydrogéologique, grâce aux précautions prises.

CONCLUSION

Nous espérons que dans le présent rapport général, nous n'avons pas passé sous silence trop de points essentiels, nous demandons dans ce cas

aux auteurs de bien vouloir apporter, au cours de la discussion, tous compléments ou rectifications qui leur sembleraient nécessaires. Nous pensons d'ailleurs que la discussion de la question V permettra des échanges de vues fructueux et un plus ample examen des problèmes qui y sont liés.

Lorsque l'on passe en revue les moyens dont dispose actuellement l'ingénieur pour éviter toute conséquence dommageable des ouvrages qu'il construit sur le cycle hydrométéorologique et l'environnement, on rencontre des situations fort inégales. Nous avons déjà dit par exemple que, en ce qui concerne l'influence sur les nappes, les ingénieurs paraissent pouvoir résoudre avec maîtrise la plupart des problèmes. Dans le domaine biologique et météorologique, les résultats sont moins satisfaisants bien que moins

inquiétants qu'on ne le dit parfois. Mais le point commun à ces divers types d'études, c'est la nécessité de procéder à une analyse de la situation aux points de vue climatologique, hydrogéologique, biologique etc. *avant* les travaux et à une étude préalable de ce que pourrait être cette situation en cours des travaux et pendant l'exploitation normale. Ces études devraient être effectuées en collaboration avec les spécialistes des diverses disciplines intéressées. Il faut également un contrôle des résultats obtenus pendant les travaux et après. Souvent, une expérimentation préliminaire est nécessaire.

C'est à ce prix que sans compromettre les objectifs principaux des aménagements, on arrivera à rendre bénéfiques leurs conséquences sur le cycle hydrométéorologique et l'environnement.