**POLLUTION
DE LA BASSE-SEINE
LUTTE
CONTRE LES MOUSSES**

PAR L. MOINEAU *

Le problème de la pollution par les détergents était à peu près inconnu sur la Basse-Seine, comme sur la plupart des rivières, il y a quinze à vingt ans. Les détergents eux-mêmes étaient encore utilisés en petite quantité et leurs effets dans les rivières passaient à peu près inaperçus.

**Les nuisances
causées par les détergents**

a) Les mousses.

Les premières manifestations de la présence des détergents sont apparues au cours des étés secs vers les années 1949-1950, au barrage de Poses, qui est le dernier des barrages de la Seine avant la mer.

D'abord limités à quelques paquets isolés de mousse emportés par le courant et par le vent, ces paquets sont devenus, d'été en été, de plus en plus abondants et de plus en plus importants, leur formation se produisant toujours en aval du barrage, plus rarement dans la grande écluse.

De plus, des paquets de mousse apparurent aux autres barrages en remontant le fleuve, à Notre-Dame-de-la-Garenne, à Port-Villez, — barrage qui a été supprimé en 1962, mais qui était encore en service au moment de l'apparition des mousses —, puis à Méricourt (encore équipé de bouchures à rideaux Camère). Enfin plus récemment, vers les années 1955 à 1960 aux barrages des Mureaux (supprimé en 1964), d'Andrésy, Denouval, Chatou et Marly, enfin à Suresnes.

Toutefois, le phénomène est resté particulièrement important à Poses où la chute est aussi plus importante (atteignant 8 m en étiage de vive eau), alors que les autres chutes de la Basse-Seine varient entre 3 et 5 m.

Mais à tous les barrages, de véritables « champs de mousse » atteignant parfois plusieurs kilomètres de longueur et plusieurs mètres d'épaisseur sur toute la largeur de la rivière, ont été observés à partir des années 1960 en certaines périodes de l'année.

Les analyses effectuées par différents laboratoires, notamment grâce au concours de l'IRCHA (*), qui doit être remercié pour le précieux concours qui nous a été apporté, ont rapidement permis de mettre en cause des détergents couramment produits à l'heure actuelle, détergents dits de la première génération, *qui ne sont pas biodégradables*, c'est-à-dire que l'épuration biologique, tant en rivière qu'en station d'épuration, n'a sur eux que pas ou très peu de prise.

La circonstance des déversements considérables d'eaux usées en Seine, provenant de la région parisienne, avec ou sans passage dans les stations d'épuration d'Achères, et celle de l'énorme développement de la consommation des détergents de première génération, rendent compte des effets observés de bout en bout, et principalement à chaque chute du fleuve, là où l'eau est normalement brassée par déversement, en reproduisant à grande échelle le phénomène du brassage dans la machine à laver.

Ajoutons qu'à chaque point du fleuve où un brassage se produit avec projection d'eau, au droit

* Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

(*) Institut de Recherches Chimiques Appliquées.

Mousses à l'aval du barrage de Poses.
Foam downstream of Poses barrage.

(Studio HENRY - Louviers.)

de certains déversements, ou au passage d'automoteurs légers dont l'arrière « déjaugé », on observe également de la mousse, bien qu'en quantité sans commune mesure avec celle qui s'observait aux barrages. Des quantités importantes de mousse étaient également constatées dans les écluses, mais il est essentiel de remarquer que cette présence de mousse dans les écluses était provoquée non par la formation de la mousse dans les écluses elles-mêmes, mais par l'entraînement de la mousse, déjà formée au barrage voisin, soit par le vent, soit par les bateaux eux-mêmes, (bateaux montants entraînant avec eux la mousse formée en aval du barrage).

Ces phénomènes se présentent encore occasionnellement aux ouvrages de Poses, plus rarement aux ouvrages de La Garenne et ont pratiquement disparu aux autres barrages, grâce au palliatif que nous avons mis en œuvre en modifiant le procédé de réglage de ces barrages, procédé sur lequel nous reviendrons ci-dessous.

Avant de signaler les autres nuisances observées, provoquées ou aggravées par les détergents, il convient de souligner qu'en dehors de l'aspect spectaculaire et désagréable des champs de mousse observés sur un fleuve traversant des régions aussi urbanisées que le sont les rives de la Seine, des

aspects beaucoup plus dangereux sont vite apparus.

Des chutes suivies de noyades ont été provoquées par les mousses, dont l'importance empêche le repérage des personnes tombées à l'eau, et empêche celles-ci, même lorsqu'elles sont en état de nager, de s'orienter et de regagner une rive.

La mousse les aveugle en effet et les désoriente.

De plus, des collisions de bateaux se sont produites dans des écluses pleines de mousse, et il est arrivé à Poses que les écluses soient remplies de mousse, au-dessus des bajoyers, et que les éclusiers ne puissent plus distinguer l'arête de ceux-ci, et courent ainsi les plus graves dangers.

Enfin, il est arrivé que la mousse, poussée par le vent, envahisse également les abords des ouvrages et pénètre dans les habitations, faisant également courir des désagréments et des dangers certains à leurs habitants, étant donné les facteurs multiples de pollution que favorisent, aggravent ou transportent les mousses provoquées par les détergents.

b) Action inhibitrice sur l'oxydation naturelle.

Selon les observations formulées par différents auteurs, et que confirment nos propres observations, les détergents ont une action inhibitrice sur

Mousses dans la grande écluse de Méricourt.
Foam in the large Méricourt lock.

(Studio J.-F. BERTIN - Mantes-La-Jolie.)

l'oxydation naturelle qui se produit dans les rivières.

En effet, nous avons observé, en même temps que l'augmentation de la teneur en détergent, une diminution progressive de l'oxygène dissous, celui-ci descendant fréquemment au-dessous de 1 mg par litre dans la région parisienne, entre Clichy-Colombes et Bougival, après le débouché des égouts municipaux. Or, c'est au-dessous de cette valeur de 1 mg par litre que toute vie est arrêtée dans l'eau, aussi bien dans le règne animal que dans le règne végétal.

Les détergents ne sont pas assurément la seule cause de cette diminution de l'oxygène dissous; les matières organiques apportées par les résidus rejetés par les égouts urbains et les industries alimentaires sont, pour une part importante, responsables de cette diminution catastrophique, mais les détergents aggravent le phénomène.

c) Toxicité.

La toxicité des détergents dans la région susmentionnée à l'égard de la faune aquatique, n'a guère pu être mise en évidence, car cette faune dans cette région, était déjà fort réduite chaque été, au moment de l'apparition des détergents. Par contre, dans les régions plus en aval, notamment

dans la région de Méricourt où des bras secondaires du fleuve, aménagés en réseaux de drainage, sont encore très poissonneux, parce que normalement alimentés, non par le fleuve, mais par la nappe phréatique, la contre-épreuve a pu être faite consistant à compléter cette alimentation par la nappe phréatique, au moyen d'une vanne communiquant avec le fleuve :

L'ouverture de cette vanne provoque au bout de quelques jours, une diminution sensible de la faune aquatique.

Il convient de mentionner, dans ce domaine de la toxicité, les risques que font courir à la nappe d'eau potable de Croissy, la présence des détergents par le risque de passage de ceux-ci du fleuve dans la nappe, qui est réalimentée par lui moyennant filtration à travers les sables et graviers.

Paramètres qui affectent les nuisances par les détergents

a) La concentration et la qualité de matières en suspension.

Selon les mesures faites par l'IRCHA, il faut atteindre des concentrations de l'ordre de 0,8 à 1 mg/l, pour voir apparaître des mousses persis-

tantes dans la région entre Clichy et Bougival, tandis qu'il suffit d'une concentration de 0,4 mg pour voir apparaître ces mousses à Poses ou à Notre-Dame-de-la-Garenne. Cette variation de la concentration faisant apparaître la mousse, est à rapprocher de la variation de la quantité de matières en suspension. En effet, la formation de la mousse décroît quand la quantité de matières en suspension augmente.

Or, entre les points de déversements des égouts municipaux de la région parisienne, et la partie aval de la rivière qui reçoit à Conflans l'apport de la rivière d'Oise, moins chargée en matières en suspension, celles-ci décantent et les savons d'acides gras sont rapidement biodégradés.

D'une manière générale, le taux de concentration à partir duquel il y a formation de mousse stable, se situe entre 0,3 et 0,4 mg/l.

Dans la Seine, compte tenu des déversements effectués qui doivent être grossièrement constants avec une légère baisse pendant le mois d'août, cette concentration est atteinte chaque fois que le débit du fleuve descend au-dessous de 150 à 200 m³ par seconde en amont du confluent de l'Oise, et entre 250 à 300 m³ par seconde en aval de ce confluent.

b) Présence de protéines apportées par les égouts urbains et les industries alimentaires.

Ces protéines favorisent la formation de la mousse. Cette observation n'est nullement contradictoire avec l'observation que nous venons de rapporter concernant l'influence du taux de matières en suspension.

c) La température.

La température, ou plutôt l'échauffement, dû à l'ensoleillement des mousses, est un facteur puissant de rupture des films constituant les parois des bulles. En effet, par la dilatation des gaz occlus, il y a étirement du film, ce qui peut provoquer sa rupture. Cette observation, que j'extrais du livre de M. Prat : « La pollution des eaux par les détergents », rejoint nos propres observations.

Les mousses diminuent, toutes choses égales d'ailleurs, quand la température augmente.

d) Le pH et facteur divers.

En milieu acide, l'affinité des protéines augmente pour les substances tensio-actives.

D'une manière générale, tout facteur provoquant un abaissement de tension superficielle favorise la formation des mousses, en diminuant l'énergie nécessaire à l'augmentation de surface considérable qui en résulte.

**Les solutions
aux problèmes posés par les
détergents en Seine**

Avant d'exposer les solutions mises en œuvre ou à l'étude, concernant les deux premiers types de nuisance, c'est-à-dire la destruction mécanique des mousses, et la réoxygénation, je dirai un mot de l'état de la mise au point et de la généralisation des détergents biodégradables, afin de souligner l'intérêt de cette solution idéale, mais dont la réalisation semble encore lointaine, et par suite l'intérêt de tous les palliatifs immédiatement réalisables.

a) Etude et mise en œuvre des détergents biodégradables.

Nous avons déjà rappelé que les grands responsables des principales nuisances observées sont les détergents dits de première génération, non biodégradables.

Or, des types de détergents presque complètement ou complètement biodégradables en station d'épuration sont connus, mais paraissent, dans l'état actuel des choses, soit imparfaitement au point, soit économiquement inacceptables. De plus, ces produits présenteraient une toxicité inquiétante.

A l'étranger, il existe en Allemagne Fédérale une réglementation spéciale contre la pollution par les détergents (loi d'octobre 1961 et décret de décembre 1962).

La législation en vigueur interdit de commercialiser des produits dont le taux de biodégradabilité n'atteint pas 80 % selon un test de biodégradabilité défini par ce texte.

En Belgique, il ne paraît pas exclu qu'une réglementation spéciale intervienne, ainsi qu'en Irlande, en Roumanie, en Suisse notamment. En Grande-Bretagne et aux Etats-Unis, les producteurs de détergents s'équipent résolument pour la fabrication des biodégradables (détergents de deuxième génération), mais aucune législation n'est envisagée.

La R.F.A. a présenté en octobre 1966 au Comité de Santé Publique du Conseil de l'Europe, un projet de résolution internationale tendant à la généralisation de sa législation spéciale contre les détergents non biodégradables.

Mais ce projet n'a pas été accepté par son comité qui a décidé de réunir un groupe de travail.

En France, la position française à Wiesbaden n'a pas été étrangère à la décision de différer l'adoption d'une résolution internationale.

La question se pose de savoir s'il convient ou non de se servir de l'arme juridique offerte par l'article 6 de la loi du 16 décembre 1964, ainsi conçu :

« Des décrets en Conseil d'Etat déterminent les conditions dans lesquelles peuvent être réglementées la mise en vente et la diffusion de certains produits susceptibles de donner naissance à des déversements qui ont fait l'objet d'une interdiction ou d'une réglementation, ou d'accroître leur nocivité ou d'aggraver leur nuisance. »

Convient-il d'utiliser ce texte pour interdire, à terme, la fabrication et l'emploi des détergents non biodégradables, et rendre, dans l'état actuel des choses, obligatoire l'usage des détergents de deuxième génération?

En effet, selon la conclusion du Comité National de l'Eau, à qui j'emprunte cette mise au point :

- certains de ces détergents de deuxième génération seraient plus riches en polyphosphates que ceux de la 1ère génération. Leur pollution annexe serait ainsi augmentée;
- leurs produits de dégradation seraient plus toxiques que ceux des non biodégradables;
- ils seraient moins perméables à l'oxygène.

En conséquence, des études sont actuellement en cours pour préciser ces inconvénients, et également pour mettre au point un type de détergent, de troisième génération, qui ne présente pas ces inconvénients.

Il semble opportun dans ces conditions, d'attendre le résultat de ces études, avant d'interdire

éventuellement l'emploi des détergents de première génération.

Deux circonstances incitent d'ailleurs à la prudence :

- a) les détergents de deuxième génération ne seraient guère plus biodégradables au fil de l'eau que ceux de première génération. Or, 80 % des eaux usées en France, et un pourcentage au moins égal à cette valeur pour la Seine, sont épurées au fil de l'eau sans passage par les stations;
- b) ces détergents de deuxième catégorie ne sont pas détruits en atmosphère anaérobie. Les nappes souterraines ne seraient pas mieux protégées.

En résumé, l'interdiction des détergents non biodégradables ne paraît pas pouvoir être effective avant plusieurs années. Par suite, les procédés mécaniques, dont nous allons rendre compte, de destruction des mousses d'une part, et réoxygénation de l'autre, prennent tout leur intérêt dans la conjoncture actuelle.

b) Destruction mécanique des mousses par réglage des barrages.

1. Nos premières expériences de destruction mécanique de la mousse, effectuées avec le concours de l'IRCHA, ont consisté dans l'emploi d'hydro-turbines de petites dimensions. Rappelons que ces hydroturbines sont alimentées par une arrivée d'eau sous pression qui est diffusée en nappe de fines gouttelettes par l'appareil.

Sans être nul, l'effet obtenu par ce procédé était absolument hors d'échelle avec le phénomène des mousses observé aux barrages de la Seine : cet effet était en effet de l'ordre du mètre carré de surface de mousse détruite mais aussitôt reformée, alors que les champs de mousse étaient de l'ordre du kilomètre carré.

Nous reviendrons tout à l'heure sur l'emploi des turbines à propos de nos essais de réoxygénation, car si l'emploi des hydroturbines en rivières est finalement hors d'échelle avec la destruction de la mousse à l'aval des barrages dans des champs de mousse considérables, cet usage peut être intéressant pour la destruction de faibles quantités de mousse très localisées et peut trouver son emploi dans d'autres applications, notamment à l'occasion d'expériences de réoxygénation sur lesquelles nous reviendrons.

2. Nous avons également fait l'essai d'*aspirateurs de mousse* de différents calibres, sortes de « balais aspirateurs » poussés par un canot et recueillant la mousse concentrée dans un réservoir. Ce procédé aurait eu le mérite de faire disparaître réellement une certaine quantité de détersif, la concentration du « jus de mousse » recueilli atteignant plusieurs centaines de fois celle du détergent dans l'eau. Malheureusement, là encore, le procédé était tout à fait hors d'échelle avec le phénomène : l'aspirateur, déplacé sur la rivière dans le champ de mousse, laisse derrière lui un sillage libre de mousse sur quelques dizaines de mètres de longueur, mais au bout de cette distance, la mousse se reforme par rapprochement des bords de la « tranchée » creusée dans le champ de mousse.

3. Finalement, nous avons eu l'idée d'essayer de modifier la consigne de réglage des barrages, en essayant d'assurer ce réglage par écoulement sous les vannes en « orifice noyé », au lieu de l'écoulement

par dessus en « déversoir » généralement utilisé.

La plupart des barrages construits depuis une quarantaine d'années sur la Seine sont en effet des barrages à vannes levantes, la bouchure étant constituée par deux vannes qui peuvent être commandées ensemble ou séparément. C'est normalement la vanne supérieure qui assure le réglage courant du niveau du bief, cette vanne étant réglée pour assurer le déversement correspondant au débit du fleuve. La vanne inférieure n'est manœuvrée qu'en période de grande crue pour être relevée complètement, en même temps que la vanne supérieure, au-dessus du gabarit « tirant d'air » nécessité par le passage de la navigation à travers le barrage ainsi effacé.

Tel est du moins le cas des barrages de Chatou (construit en 1932) de Suresnes (pour partie) construit vers la même époque, d'Andrésy (mis en service en 1958), de Méricourt (mis en service entre 1962 et 1964), et plus récemment, au fur et à mesure de sa modernisation, du barrage de Notre-Dame-de-la-Garenne. Nous reparlerons du barrage de Poses également équipé, sur deux passes, de vannes levantes, mais dont le seuil présente la particularité de se trouver, aux périodes de basses mer et d'étiage, à un niveau supérieur au niveau du plan d'eau aval. Enfin, plus récemment, le barrage de Bougival mis en service en 1966, permet l'écoulement sous les vannes (qui sont du type secteur).

L'expérience d'écoulement sous les vannes, que nous avons faite pour la première fois en octobre 1962 à Chatou, a réussi au-delà de nos espérances : en effet, un champ de mousse qui s'étendait avant cette manœuvre sur plus de 3 km de longueur et sur toute la largeur de la rivière avec une épaisseur de plus de 1 mètre, a *complètement disparu* au bout d'une trentaine de minutes.

Non seulement l'écoulement ainsi provoqué « en orifice noyé » ne provoque pas de formation de mousse, mais les paquets de mousse préexistants sont entraînés dans le « ressaut » provoqué immédiatement à l'aval du barrage et disparaissent absorbés dans ce ressaut, pour ne plus reparaitre.

La « contre-épreuve » a pu être faite au cours de la même expérience : l'écoulement par dessous a été arrêté et l'écoulement par déversement repris.

Immédiatement, les mousses sont réapparues, et au bout d'un quart d'heure, un nouveau champ de mousse se reformait, comparable à celui qui existait au début de l'expérience.

L'expérience a été renouvelée avec le même résultat favorable, les jours suivants.

Une modernisation de la commande et du

1/ Barrage de Chatou.
Chatou barrage.

2/ Barrage de Méricourt (passes profondes).
Méricourt barrage (deep channels).

3/ Barrage de Notre-Dame de La Garenne.
Notre-Dame de La Garenne barrage.

contrôle des mécanismes de levage des vannes à Chatou a été immédiatement étudiée (et aujourd'hui réalisée), pour faciliter l'application en permanence de la nouvelle consigne de réglage du barrage.

Il était indiqué de tenter la même expérience aux autres barrages de la Basse-Seine équipés de vannes levantes. C'est ce que nous avons fait quelques jours après à Andrésy, exactement dans les mêmes conditions, et avec le même résultat favorable : pas de formation de mousse. Disparition de la mousse préexistante. Le même phénomène du ressaut, à l'aval immédiat du barrage, détruit les paquets de mousse préexistants.

A Suresnes, l'expérience a également été faite sur la partie de ce barrage qui comporte des vannes levantes. Les résultats ont également été favorables en ce qui concerne la mousse, l'écoulement sous les vannes produisant les mêmes phénomènes d'arrêt de la formation des mousses. Toutefois, la manœuvre faite à Suresnes a entraîné une émulsion de la vase accumulée dans le bras de Neuilly, provoquant un dégagement important d'hydrogène sulfuré qui s'est traduit par l'apparition d'un banc de poissons morts.

La manœuvre des vannes à Suresnes demanderait donc à être répétée plus souvent, à de courts intervalles, même en dehors des périodes propices à la formation de la mousse, pour éviter l'accumulation de vase dans le fond de la rivière en amont du barrage.

Au barrage de Méricourt, que nous avons équipé progressivement de vannes levantes, à partir de 1962, et qui est actuellement entièrement équipé de ce type de vannes, nous avons d'abord éprouvé de la difficulté à constater l'effet favorable de l'écoulement sous les vannes, car nous disposions d'une seule vanne levante, et étions obligés de maintenir en service une partie de l'ancienne bouchure à rideaux, laquelle bouchure comportait de nombreuses fuites, et provoquait une formation importante de mousse.

Dans les années suivantes, nous avons pu mettre en service successivement, les vannes construites dans les cinq passes du barrage et une amélioration considérable a été obtenue.

Toutefois, nous obtenons cependant une faible quantité de mousse (d'épaisseur de l'ordre du centimètre), qui se dissout au bout de 50 à 100 m, et ne gêne pas la navigation. Ce fait est à rapprocher des deux circonstances suivantes :

1. Présence des débris d'un ancien barrage situé

à 30 m en aval du nouveau barrage, et dont une partie des anciennes maçonneries se trouve à une profondeur très faible sous le plan d'eau aval d'étiage.

Il semble que le passage de l'eau sur ces anciennes maçonneries soit accompagné dans certaines circonstances, d'un brassage qui fait réapparaître une petite quantité de mousse ;

2. Le seuil des vannes profondes de Méricourt est à la cote 8,50, cote inférieure de 3,50 à la cote du plan d'eau aval d'étiage (cote 12), et le seuil des deux vannes rive droite est à la cote 10,75, inférieure de 1,25 m seulement sous le plan d'eau aval d'étiage.

Le ressaut obtenu à l'aval des vannes, par écoulement par-dessous est moins net qu'à Chatou et à Andrésy.

Au barrage de Notre-Dame-de-la-Garenne, situé plus en aval, nous ne disposons encore actuellement que de deux vannes levantes, permettant l'écoulement par-dessous les vannes, et nous sommes gênés par l'ancienne bouchure des quatre passes encore équipées de rideaux Camère.

Par ailleurs, le seuil des vannes est à la cote 6,50, inférieure de 1,50 à la cote du plan d'eau aval d'étiage (cote 8). Enfin, une fosse profonde de 5 à 7 m s'est formée à l'aval des passes pourvues de vannes levantes, fosse que nous tapissons d'enrochements. Nous ne pouvons pas dire encore avec certitude si la règle de l'écoulement par-dessous les vannes, est suffisante à Notre-Dame-de-la-Garenne pour éviter la formation de mousse.

La prochaine modernisation d'une passe supplémentaire du barrage en 1967, nous permettra de poursuivre nos expériences dans de meilleures conditions à ce barrage.

A Poses, comme nous le rappelons ci-dessus, la règle de l'écoulement en orifice noyé est inapplicable en période d'étiage et de basse mer, et la question se pose pour nous de savoir s'il convient d'équiper les deux passes de ce barrage, encore pourvues de bouchures anciennes à rideaux, au moyen de vannes levantes suffisamment profondes pour que la règle de l'écoulement en orifice noyé puisse être appliquée avec succès.

Interprétation

Il est important, pour la poursuite de nos études, et en particulier pour la fixation des caractéristiques des bouchures de barrages qui restent à

4/ Barrage de Poses (situation actuelle).
Poses barrage (present condition).

5/ Barrage de Poses (disposition projetée).
Poses barrage (planned future condition).

moderniser, de pouvoir codifier la règle de l'écoulement en orifice noyé, pour être en mesure de fixer ces caractéristiques avec le maximum de garantie.

Nous nous sommes trouvé pratiquement devant la nécessité d'expérimenter en « vraie grandeur ». L'ensemble des conditions d'écoulement d'un barrage, joint aux paramètres qui influent sur la formation des mousses, rendraient en effet malaisées et très onéreuses des expérimentations en laboratoire. Par ailleurs, nos expériences en « vraie grandeur », gênées par le souci de ne pas perturber la navigation, n'ont pratiquement pas pu être poursuivies au cours de l'été dernier, faute de conditions favorables à l'apparition de la mousse.

L'été dernier a été, en effet, à peu de chose près, un été sans mousse, le débit de la rivière n'étant guère descendu au-dessous des débits de 250 à 300 m³ en aval de l'Oise, qui auraient permis l'expérimentation.

Malgré cette difficulté, nous suggérons l'hypothèse de travail suivante, qui pourra nous guider dans les expériences ultérieures :

La non-formation de mousse aux barrages est acquise complètement, lorsque l'écoulement en orifice noyé provoque le phénomène du ressaut simple.

Cette non-formation de mousse est encore acquise, à peu de chose près, lorsque l'on provoque un ressaut ondulé ou un ressaut noyé.

Il apparaît donc que c'est au moment du passage du régime fluvial au régime torrentiel, au droit de l'orifice sous le barrage, puis du régime torrentiel au régime fluvial au droit du ressaut, que la mousse est détruite. En d'autres termes, ce serait la condition du ressaut, soit vitesse de l'eau V plus grande que la vitesse critique V_r , avec :

$$V_r = \sqrt{gh},$$

h étant la profondeur sous le plan d'eau aval ou, en d'autres termes, nombre de Froude supérieur à 1, soit :

$$\mathcal{F} = \frac{V^2}{gh} > 1,$$

qui conditionnerait la non-formation de mousse.

En termes plus imagés, il serait nécessaire de provoquer un « bang » hydraulique pour détruire la mousse. On peut traduire de plus près nos observations en écrivant : si le nombre de Froude est supérieur à 3, (cas de Chatou, Andrésy et Suresnes), on obtient un ressaut simple et la formation

de mousse est totalement évitée; si le nombre de Froude est légèrement supérieur à 1 (cas de Méricourt), on obtient un ressaut ondulé ou noyé avec très peu de formation de mousse.

Si le nombre de Froude est inférieur à 1 (cas de Notre-Dame-de-la-Garenne, dans l'état de l'équipement du barrage), on ne provoque pas de ressaut, et on n'évite pas la formation de mousse.

Si cette hypothèse est exacte, plusieurs solutions seraient possibles pour assurer la non-formation de mousse à Notre-Dame-de-la-Garenne : combler partiellement la force à l'aval des vannes en prolongeant les radiers vers l'aval (de manière à diminuer la valeur de h et par suite la valeur de la vitesse critique, et ramener celle-ci à une valeur inférieure à celle obtenue pour l'eau qui s'écoule sous les vannes), ou bien (solution applicable aux vannes à construire), augmenter la hauteur des vannes en abaissant les nouveaux radiers.

À Poses, ces solutions seraient également concevables. En outre, une forme appropriée, à donner aux anciens radiers en forme de déversoirs devrait permettre de provoquer le phénomène du ressaut, et par suite d'éviter la formation de mousse sans qu'il soit indispensable de recourir à l'écoulement en orifice noyé, type d'écoulement qui serait difficile à obtenir à Poses, étant donné la hauteur considérable qu'il serait nécessaire de donner aux vannes pour obtenir ce résultat.

En résumé, la solution de l'écoulement en orifice noyé constitue dans l'état de nos études et sous certaines conditions, un palliatif intéressant pour éviter la formation de mousses aux barrages qui permettent ce type d'écoulement.

De nouvelles expériences seront nécessaires pour achever de codifier les conditions dans lesquelles doivent être effectués ces types d'écoulement.

c) Etude sur la réoxygénation de la Seine.

L'idée de procéder à la réoxygénation des eaux de la Seine dans le fleuve lui-même, nous a été suggérée par un certain nombre d'essais effectués à l'étranger : notamment en Suisse (lac de Bret), à Chicago (aération d'un canal et dans la rivière Chicago), en Suède (réoxygénation de lacs pollués), dans le Wisconsin (sur des rivières), enfin en Allemagne (lacs et étangs artificiels de la Ruhr), en Angleterre (dans l'estuaire de la Tamise) et en Belgique (réoxygénation de la Meuse).

D'une manière générale, ces expériences visent à extrapoler les procédés de réoxygénation par bulles d'air comprimé utilisés couramment dans les stations d'épuration, et utilisent en outre le pro-

cédé d'aération par turbines, dont l'utilisation en stations d'épuration à grande échelle a été également utilisée au Canada.

Devant la complexité du problème de la pollution sur la Basse-Seine, il nous a paru absolument indispensable de procéder en premier lieu à une étude théorique, puis à des essais en canal, avant de procéder à des essais en rivière.

Le but recherché est d'intervenir au point A de la rivière, à partir duquel la teneur en oxygène dissous descend à 1,5 mg/l (cette valeur correspond à environ 15 % de la saturation à 18 °C); nous nous proposons de rechercher un dispositif permettant de faire remonter, à cet endroit, la quantité d'oxygène dissous à une valeur de l'ordre de 4 mg/l représentant 50 % de la saturation, puis d'intervenir au point B, situé en aval où le taux d'oxygène dissous est redescendu à 1,5 mg/l, et ainsi de suite jusque dans la section de rivière suffisamment éloignée vers l'aval, pour que le pouvoir naturel de réoxygénation satisfasse, sans intervention, à la condition « teneur en oxygène supérieure à 1,5 mg/l ».

Pour se faire une idée de l'espacement des points d'intervention successifs A, B, C, etc., on utilise les courbes de Fair représentant les courbes d'oxygène en fonction du kilométrage.

Quant aux techniques de réoxygénation susceptibles d'être envisagées, citons :

- a) pour mémoire, les déversoirs, que nous avons reconnu être incompatibles avec la condition d'éviter la formation de la mousse;
- b) les hydroturbines, utilisées aux U.S.A.; mais ce procédé implique l'existence d'un barrage hydro-électrique, ce qui ne peut être envisagé dans la région parisienne;
- c) les turbines flottantes, qui semblent *a priori* une solution acceptable;
- d) les procédés à air pulsé qui semblent également une technique valable dans le cas de la Seine, puisqu'une rampe d'expulsion d'air posée sur le lit du fleuve ne gênerait pas la navigation. Nous avons donc retenu pour nos essais : la rampe à air pulsé et la turbine flottante. Nous avons confié la conduite de ces essais, sous notre direction, à l'Omnium d'Assainissement, avec le concours des ingénieurs du Centre d'Essais de Chatou, qui ont bien voulu mettre à notre disposition une cuve en béton armé située dans l'île de Chatou, près de la Rivière-Neuve, ainsi qu'une partie du matériel et du personnel nécessaires.

Il convenait :

- 1° d'étudier les capacités d'oxygénation des différents systèmes d'aération dans une installation, expérimentable en cuve d'essai;
- 2° de prévoir les modalités de réalisation à grande échelle dans un cours d'eau navigable de grande largeur;
- 3° de prévoir l'application des dispositions retenues au cas de la Seine à l'aval de Paris.

Les essais effectués ont porté sur quatre types de dispositifs d'aération :

- aération par injection d'air à 3 m de profondeur, sous forme de grosses bulles au moyen de tubes d'acier 26/34 débouchant à gueule bée dans le bassin;
- aération par injection d'air à 2,70 m de pro-

fondeur sous forme de fines bulles, au moyen de tubes poreux *Schuler* (le diamètre des trous est de l'ordre de 90 μ);

- aération par injection d'air à 0,80 m de profondeur sous forme de moyennes bulles, au moyen de grilles perforées INKA percées de trous de 6 mm de diamètre;
- aération par turbines placées à la surface du liquide.

Les essais pour chacun de ces dispositifs devaient permettre de déterminer la capacité d'oxygénation, la consommation d'oxygène, l'influence sur les détergents, enfin les possibilités d'application à grande échelle et les essais complémentaires à réaliser.

Les essais ont été réalisés de juillet 1966 aux premiers jours de 1967, dans un bassin de 14,50 m de longueur sur 3,20 m de largeur et 3,50 m de profondeur moyenne. Pour les essais des dispositifs d'aération par insufflation d'air, le bassin était équipé dans son axe longitudinal d'un voile réalisé en plaques éternit de 1,80 m de haut, et dont l'arête inférieure était à 0,40 m du radier. Ce dispositif avait pour but de favoriser la mise en rotation de la masse liquide. De l'autre côté du voile, était placé un flocculateur à quatre pales; la vitesse linéaire de l'appareil était de 8 cm/s en bout de pale. Cette vitesse est celle que l'on rencontre en Seine au cours d'un étiage. Le rôle du flocculateur était de simuler en bassin les mouvements tourbillonnaires existant en Seine à l'étiage. Pour les essais par turbines, le voile longitudinal et le flocculateur ont été déposés.

Le bassin était alimenté en eau de Seine puisée dans le bras de la Rivière-Neuve, par l'intermédiaire d'une pompe verticale *Martin*, montée sur radeau. La vidange du bassin était réalisée gravitairement en Seine en 30 mn. L'air comprimé était fourni par trois ventilateurs centrifuges AERIC; chaque ventilateur était entraîné par un moteur de 22 kW par l'intermédiaire d'un équipement par poulies et courroies.

Les mesures de la DBO, du pH, du taux de matières en suspension, étaient réalisées par les soins du Laboratoire du Service de l'Assainissement de la Seine. Les mesures étaient faites à partir d'échantillons prélevés au débouché du siphon servant à la mesure et à l'enregistrement de la teneur en oxygène dissous. La mesure du taux de détergents était effectuée dans les laboratoires de l'IRCHA à l'Ecole Polytechnique, à partir d'échantillons prélevés comme précédemment.

La mesure de l'oxygène dissous a été effectuée d'abord suivant la méthode de Winckler, puis au moyen de l'analyseur *Beckman*; l'indication de l'analyseur d'oxygène était enregistrée; la température était mesurée au thermomètre indicateur-enregistreur *Richard*. Le débit d'air comprimé était mesuré par un débitmètre indicateur enregistreur *BERI*. La capacité d'oxygène a été suivie en utilisant la loi de Henry :

$$C = C_s (1 - e^{-kt})$$

traduite en coordonnées semi-logarithmiques pour obtenir une loi linéaire.

Aération par injection d'air.

Les résultats des mesures de capacité d'oxygénation, de rendement de l'oxygénation et d'énergie

nécessaire, sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

	GROSSES BULLES	FINES BULLES	MOYENNES BULLES
Capacité d'oxygénation (mg/l.h).	136,1	127,1	150,2
Rendement (%)	5,9	7,2	1,5
Energie :			
— théorique (W/m ³).	45,5	42,0	53,5
— réelle (kWh/kg O ₂)	0,89	0,78	1,34

On voit que le système de l'oxygénation par moyennes bulles est celui qui donne la meilleure capacité d'oxygénation, mais au prix d'un rendement moindre et donc d'une plus forte dépense en énergie.

Turbines de surface.

Les turbines essayées étaient des aérateurs de surface SIMCAR type 5, de 1,40 m de diamètre extérieur, tournant à une vitesse variant de 50 à 70 tr/mn, par variation du diamètre de la poulie d'entraînement du réducteur.

L'aérateur est constitué par un cône en forte tôle, dont la pointe est dirigée vers le bas.

A la sous-face du cône sont soudées huit lames réalisées en cornières de 0,10 m. Chaque cornière est prolongée à l'extérieur du cône par une partie horizontale de 0,16 m environ. L'ensemble était placé au-dessus d'un compartiment du bassin initial, ce dernier ayant été divisé en deux parties par une cloison en éternit. L'appareil a été essayé pour trois vitesses de rotation de 50, 57 et 62 tr/mn et pour trois immersions différentes :

- $H = 0$ (niveau du plan d'eau maintenu au niveau de la partie horizontale des lames, cornières débordant le cône lui-même);
- $H = +10$ (l'ensemble était immergé de 10 cm);
- $H = -10$ (le niveau du plan d'eau se trouvait au niveau du bas de la partie verticale des cornières débordant le cône).

L'appareil projette l'eau du centre vers l'extérieur du cône. L'eau projetée est divisée en gouttes qui retombent en pluie sur la surface du bassin. Le rendement de l'oxygénation doit donc être élevé, puisque se conjuguent l'effet du contact de la goutte avec l'air, l'effet de pluie, et l'effet du contact de l'eau avec l'air emprisonné par les lames cornières.

Sans entrer dans le détail de ces multiples essais, disons que le meilleur résultat a été obtenu avec $H = +10$ avec une quantité d'oxygène de 224 mg/l.h avec une énergie absorbée de 0,67 kWh/kg O₂.

En définitive, les essais que nous avons effectués nous ont permis, en ce qui concerne les systèmes classiques d'aération par insufflation d'air, de rejoindre les conclusions de M. Feuillade, c'est-à-dire que, à quelques points près, tous les systèmes se valent. Les différences provenant de notions de longévité et de facilités d'exploitation des dispositifs de compression d'air correspondants; notions qui conduisent à préconiser l'insufflation à faible profondeur. Par contre, les essais ont fait égale-

ment ressortir que, en se basant sur l'énergie nécessaire pour transférer effectivement 1 kg d'oxygène dans l'eau, l'utilisation de l'aérateur de surface conduisait à une économie de l'ordre de 15 à 20 %.

Influence des détergents et conclusion.

Mais le point essentiel pour la Seine est la constance du moussage provoqué par les différents procédés. A cet égard, il a été observé que les turbines provoquent notablement moins de mousses, à quantité de détergents égales, que les autres procédés. Nous n'avons pas pu, à Chatou, faire de mesures de ce phénomène, les conditions de moussage en bassin sans autre circulation de l'eau que celle produite par les appareils eux-mêmes (par conséquent sans renouvellement de l'eau), étant très différentes des conditions réelles en rivière. Toutefois, avant de procéder à de tels essais dans la Seine elle-même, nous proposons-nous de procéder à des essais sur un ru de la région parisienne que nous choisirons spécialement chargé en détergents.

Les ordres de grandeur des quantités d'énergie que nous avons trouvés en laboratoire, nous ont montré que, à l'échelle de la Seine en étiage, la puissance nécessaire pour chaque station serait de l'ordre de 360 kW avec la réoxygénation par turbines, et de 420 kW avec la réoxygénation par bulles, pour obtenir le relèvement du taux d'oxygène à 6 mg/l comme nous le proposons au début de notre étude.

En admettant que six stations soient nécessaires, nous serions conduits à des puissances d'environ 2 000 kW avec la réoxygénation par turbines et de 2 500 kW avec l'insufflation d'air. Ces puissances sont importantes, mais non prohibitives; il est manifeste que des installations mobiles par turbines seront plus aisément réalisables que des installations de tubes immergés dans la rivière.

Il convient de noter que sur les six stations, quatre stations fonctionneraient pendant un temps limité entre zéro et quatre mois, les six stations ne tournant ensemble que pendant un mois ou deux.

En tout état de cause, ce sont les essais sur une rivière naturelle, puis les essais sur la Seine elle-même qui détermineront notre choix.

Enfin, les essais qui restent à effectuer devront également mesurer l'influence des boues, dont la remise en suspension devra être étudiée.

A cet égard, les essais effectués à Chatou ont permis de vérifier qu'une eau fortement chargée en matières en suspension ne mousse pas. Ils ont permis de situer le seuil du taux de matières en suspension à 50 mg/l pour une teneur en détergents de 1 ppm. Mais ces valeurs sont données à titre indicatif et demandent à être vérifiées en rivière.

En résumé, il semble que la réoxygénation des rivières en général puisse constituer une solution réelle et valable pour redonner aux cours d'eau une nouvelle vie.

Toutefois, il est bien entendu que ces dispositifs n'auront jamais l'efficacité de la mise en place de stations d'épuration aux sources mêmes de la pollution. Il s'agit donc, là encore, comme pour nos manœuvres de barrages, d'un palliatif plus que d'un remède, mais dont l'utilisation pourra permettre d'attendre des réalisations plus radicales.

M. GENTHIAL demande si, à Chatou, la vanne a vibré lorsqu'on a écoulé le débit par-dessous cette grande vanne.

M. GENTHIAL est d'accord pour l'assimilation d'un tel réglage avec celui envisagé par M. MOINEAU pour Poses (mise en vitesse d'une manière différente, mais avec le même résultat).

M. MOINEAU répond qu'il y a eu, en effet, à Chatou, de graves problèmes de vibrations, non au passage de l'eau en orifice noyé, mais dans les vannes supérieures anciennes. La véritable cause de ce phénomène, qui a été découverte par M. LONG-DEPAQUIT et à laquelle il a été remédié efficacement, était due à un défaut dans l'étanchéité entre les deux vannes, qui se comportait comme un mauvais caoutchouc de robinet et provoquait des vibrations.

M. le Président ajoute que c'est un phénomène heureux que les vannes ne vibrent pas pendant l'écoulement en orifice noyé : le phénomène de vibration dépend, non seulement de l'épaisseur de la lame inférieure écoulee, mais également des dimensions de la vanne (largeur et hauteur). Cet écoulement se faisant en période d'étiage, au moment où se forment les mousses, on soulève la vanne de 40 ou 50 cm seulement. Par contre, des vibrations de ce genre se sont produites sur d'autres barrages, notamment à Poses et à Andrézy avec des petits batardeaux superposés, qu'il a fallu, pour éviter l'inconvénient, manœuvrer par deux à la fois.

M. BONVALLET demande si le fait d'équiper un barrage avec un vannage spécial ne fait que déplacer le problème vers l'aval et s'il ne faut pas, de ce fait, envisager d'équiper progressivement les vannages plus en aval avec le même dispositif. Enfin, M. BONVALLET demande si les détersifs sont éliminés définitivement ou seulement rejetés en mer.

M. le Président répond rapidement :

- 1° le phénomène de l'apparition de la mousse est dû à la présence du barrage et à la mise en mouvement de l'eau par la chute superficielle; le détersif, qui n'est pas bio-dégradable, reste dans la rivière et le même phénomène se reproduit à tous les ouvrages;
- 2° à l'heure actuelle, le problème, qui est de découvrir un détersif convenable pour la dégradation des mousses, n'est pas résolu; les détersifs bio-dégradables de deuxième génération, utilisés à l'étranger, n'ont pas été adoptés en France en raison de leur toxicité et on poursuit les recherches de détersifs de troisième génération.

M. BONVALLET rappelle que les petites turbines utilisées pour répandre un brouillard d'eau sur les mousses ont une petite surface de dispersion et suggère d'adapter à l'abatage des mousses après aération et emploi des turbines les moyens utilisés en hydraulique agricole pour battre des surfaces assez considérables.

D'autre part, M. BONVALLET indique que l'emploi de la turbine de surface est à peu près uniquement réservé, à l'étranger, à des étangs ou des surfaces où l'eau est calme, car la valeur de la turbulence permet, en ce cas, d'atteindre le fond de la nappe et, par conséquent, d'aérer globalement la totalité de l'eau. S'agissant d'une masse liquide en déplacement, comme c'est le cas pour un cours d'eau, il semble que le bullage par tuyauterie disposée vers le fond permettrait, peut-être, d'obtenir un résultat en profondeur plus marqué.

M. MOINEAU répond que le système de l'air comprimé dans des tubes, que l'on pouvait supposer plus facile à mettre en œuvre dans une rivière, surtout dans une rivière navigable, s'est révélé d'un rendement très inférieur à celui des turbines SIMCAR de 1,50 m de diamètre : il en existe aussi de 3 m que l'on pourrait utiliser avec avantage.

M. MOINEAU estime, d'autre part, contrairement à l'avis de M. BONVALLET, que le dispositif d'aération par turbines n'est guère moins satisfaisant dans un cours d'eau qu'en eau calme parce qu'en période d'étiage, où ces dispositifs sont installés, la vitesse de l'écoulement est très faible et le cours d'eau se comporte comme une suite de lacs, ce qui, par ailleurs, est très malencontreux puisqu'il s'agit de pollution.

M. GARANCHER présente les remarques ci-après :

- 1° la formation de mousses étant, comme l'a dit M. MOINEAU, favorisée par les déversements des égouts, est peut-être l'indice de la saleté d'un cours d'eau;
- 2° les paquets de mousse qui se détachent de la nappe pourraient être très dangereux dans le cas où ils se déposeraient sur les signaux de chemin de fer ou de pistes d'avion proches du cours d'eau;
- 3° à la Régie des Eaux de Québec, la bio-dégradabilité du détergent est suspectée non pas à cause de la toxicité, mais parce qu'on craint qu'elle soit beaucoup moins effective dans la nature qu'en laboratoire, où la D.B.O. est réduite de 80 % environ;
- 4° à la station d'épuration d'Arras, en lutte contre les mousses, en laissant s'écouler un produit anti-mousse d'un petit bidon placé convenablement, mais ce procédé ne paraît pas applicable aux cours d'eau comme la Seine.

M. le Président répond que les essais de produits anti-mousse nécessiteraient des quantités telles de ces produits que la dépense ne peut être envisagée; que, d'autre part, ces produits posent des problèmes en ce qui concerne la nuisance dans les cours d'eau, problèmes dont, peut-être, dans une station d'épuration on ne se préoccupe pas trop; qu'enfin, les produits anti-mousse utilisés dans les machines à laver ne sont pas à encourager du point de vue de la santé du public.

Abstract

The detergent foam pollution problem in the Lower Seine

by M. Moineau *

This problem first became noticeable about twenty years ago when detergents which cannot be broken down biologically came into popular use. Very considerable quantities of these detergents are being used in France today. Until non-toxic detergents which can be broken down biologically are developed and their use is enforced, only partially effective measures against the foam pollution problem are the most one can hope for. Experimental instructions have been issued to gate-keepers at barrages on the Lower Seine to operate the bottom gate leaves so as to bring about drowned orifice flow conditions, which have been found very effective as a means of destroying detergent foam and preventing fresh foam from forming. Attempts are now being made to generalise this as normal operational procedure.

* Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.