Méthodes et outils utilisés pour l'étude des rejets en mer

Applications à différents cas d'études

P.F. Demenet et B. Quetin (*)

1. Introduction

De façon un peu schématique, on peut distinguer quatre types de rejets ⁽¹⁾ en mer :

- les rejets d'effluents urbains (a) ;
- les rejets de polluants industriels (b) ;
- les rejets thermiques (c) ;
- les rejets à caractères diffus (d).

Les rejets de type urbain (a) sont liés en général aux problèmes d'assainissement, d'extension des zones urbanisées, d'accroissement de la population, etc.

Les rejets de type industriel (b) présentent un caractère particulier, en raison de la nature des effluents déversés. Il arrive d'ailleurs que les rejets de type (a) et (b) soient mélangés.

Les rejets thermiques (c), bien que s'apparentant aux rejets de type industriel, intéressent essentiellement les centrales thermiques et nucléaires, voire les usines de dessalement (qui sont en général couplées avec des usines thermiques).

Enfin, les rejets de type (d) concernent les problèmes d'environnement que l'on rencontre mais que l'on peut difficilement rattacher de façon systématique et clairement définie à un des types précédents. Les problèmes d'eutrophisation et la pollution des baies, estuaires, lagunes entrent dans cette catégorie.

Tous ces types de rejets font courir, à des degrés divers, des risques aux espèces animales et végétales qui vivent dans la mer, ainsi qu'à l'espèce humaine par les usages qu'elle fait de celle-ci (baignade, consommation d'animaux marins, etc.). Un certain nombre de normes, exprimées sous forme de concentrations maximales acceptables dans l'eau de mer, ont alors été définies, du moins pour les catégories de polluants les plus couramment rejetées. Cette

quantification de la nuisance des polluants reste néanmoins un problème délicat car leurs modes d'action, et aussi la diversité de ceux-ci, sur les espèces précédemment indiquées sont encore bien souvent des phénomènes mal connus.

La satisfaction des normes de qualité d'eau à respecter dans le milieu récepteur conduit souvent, du moins pour les rejets de type (a) et (b) à traiter les effluents à l'amont du rejet. Ce traitement pourra être plus ou moins poussé, allant du traitement primaire (traitement minimum imposé pour tout rejet d'origine urbaine) au traitement spécifique avec recyclage (le rejet dans le milieu récepteur est alors minimal voire inexistant).

Le présent article fait l'exposé des méthodes et outils utilisés à SOGREAH pour l'étude des rejets en mer (avec ou sans traitement préalable). Cette description, qui ne prétend pas être exhaustive, s'appuiera sur des études récemment effectuées par SOGREAH dans ce domaine, en particulier :

- l'étude des émissaires de Bombay (rejets de type urbain) ;
- l'étude de la centrale thermique et de dessalement d'As-sir.

Des études récentes concernant les rejets d'effluents industriels (comme par exemple l'étude de Calais) ou les rejets à caractère diffus (comme par exemple le lac de Tunis) ne pourront être décrites ici, faute de place.

(*) Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH), 6, rue de Lorraine, 38130 Echirolles, Grenoble, France. Tél. : 76.33.40.61.

⁽¹⁾ Le terme de rejet est pris ici dans son sens le plus large, à savoir déversement de polluants dans le milieu récepteur.

Methods and modelling techniques used for sea pollution studies Applications to different case studies

This article describes some of the methods and modelling techniques used by Sogreah, in order to predict the behaviour of effluents discharged into the coastal waters. These effluents can be of different kinds : sewage disposal, industrial effluent, thermal discharge. In order to maintain the beneficial use of coastal waters, it is important to simulate, as accurately as possible, the convection, dispersion and assimilation of these effluents into the environment.

1. Emissaires de Bombay. Plan de situation.

2. Les émissaires de Bombay

Le projet retenu pour l'amélioration de l'assainissement de la ville de Bombay comporte des rejets en mer au moyen de deux émissaires d'environ 3 km de longueur chacun (cf. fig. 1).

Chaque émissaire a un diamètre variable, entre la côte et le large, de 3,50 m à 1,80 m. Le réseau d'assainissement étant unitaire (eaux usées et pluviales), les débits varient entre 4,4 m³/s et 24 m³/s.

La pente des fonds marins est très plate et il s'ensuit que la profondeur atteinte par ces émissaires est assez faible (de l'ordre de 6 à 8 m, sous le zéro des cartes).

Cette faible profondeur de rejet et l'important volume d'eau rejeté impliquaient de munir ces émissaires de diffuseurs en leur extrémité.

Le but de l'étude (effectuée à la demande de SPIE-Batignolles) consistait à dimensionner les diffuseurs (nombre et diamètre des trous, espacement entre les orifices), de façon à :

- minimiser les pertes de charge et assurer une vitesse suffisante à l'intérieur de la conduite ;
- satisfaire les normes de qualité des eaux de baignade au rivage ;
- tenir compte des contraintes technologiques (la couche de vase était telle que les émissaires devraient être supportés par des pieux disposés à intervalles réguliers ; l'emplacement des orifices devrait donc correspondre à celui des pieux).

Les calculs de pertes de charge et de vitesses dans la conduite et dans les orifices ont été effectués à partir des théories classiques des écoulements dans les diffuseurs⁽²⁾, en tenant compte toutefois des pertes de charge supplémentaires induites par les différences de section de la conduite, par les raccordements entre les différents tronçons, par les formes particulières de chaque diffuseur, ...

⁽²⁾ Voir par exemple, réf. [1].

Le contrôle de qualité des eaux a nécessité des calculs de dilution dans les champs « proche » et « lointain ». Ces derniers caractérisent des zones d'évolution des effluents rejetés et peuvent être définis de la façon suivante :

— le « champ proche » est une zone adjacente au point de rejet, dans laquelle les mécanismes responsables du mélange des eaux (dilution de l'effluent) sont essentiellement la turbulence du jet, sa force de flottabilité et l'interaction avec les courants ambiants. A l'intérieur de cette zone, les eaux contaminées se mélangent rapidement avec l'eau de mer, jusqu'à ce que la « mémoire » des conditions de rejet aient disparu, c'est-à-dire, en première approximation et pour un rejet immergé, lorsque le panache atteint la surface libre (ou le niveau de la thermocline⁽³⁾, si celle-ci existe) ;

— au-delà du « champ proche », la masse d'eau contaminée ne dispose plus d'une source d'énergie propre. On entre alors dans la zone du « champ lointain », dans laquelle la masse d'eau polluée est simplement soumise aux courants régnants et à la turbulence induite par ces derniers, qui continuent à créer un certain mélange avec l'eau de mer et donc à réduire les concentrations.

Les calculs de dilution, et donc de concentrations, ont été effectués avec deux modèles mathématiques mis au point par SOGREAH, les programmes JET et DIFMAR :

• Le premier programme (JET) permet le calcul de la dilution d'un fluide émis, sous forme de jet (ou de panache), dans un fluide récepteur de densité différente. Le milieu récepteur peut être immobile ou soumis à des courants ambiants. Il est possible de tenir compte aussi de stratifications thermiques, et donc densimétriques des eaux marines. Le programme intègre les équations de continuité, de quantité de mouvement et de flux de flottabilité (conservation d'un scalaire passif), en supposant une répartition axisymétrique gaussienne des vitesses et concentrations moyennes. En présence d'un courant ambiant, le programme tient compte d'une force de traînée exercée par l'écoulement du milieu récepteur sur le jet et d'une loi d'entraînement d'eau modifiée. Les conditions initiales sont prises à la sortie de la zone d'établissement de l'écoulement (zone de transition) et les équations sont résolues par une méthode classique de résolution des équations différentielles. A la demande de l'IFREMER, ce programme a d'ailleurs été adapté au cas où la vitesse du milieu récepteur varie en intensité et en direction en fonction de la profondeur (trajectoire tridimensionnelle du jet, cf. réf. [2]).

• L'application du programme DIFMAR suppose une homogénéité du champ des courants sur l'ensemble de la zone polluée, à chaque instant considéré. Les vitesses peuvent cependant varier en intensité et direction en fonction du temps et on peut tenir compte d'un courant de

⁽³⁾ La thermocline est une stratification en densité induite par un réchauffement (diurne, saisonnier ou permanent) des couches supérieures des océans. Cette stratification, lorsqu'elle existe, est d'une importance capitale en ce qui concerne la dispersion des polluants. Le panache peut en effet être arrêté dans son ascension à une profondeur donnée et le mélange dû à la diffusion verticale est freiné.

dérive permanent. Ce programme calcule donc la diffusion d'une masse d'eau polluée, en prenant en compte les trois phénomènes principaux de :

- convection par les courants marins ;
- diffusion turbulente ;
- disparition d'un polluant en mer (loi de décroissance bactérienne, par exemple).

Le principe du calcul repose sur l'existence d'une solution analytique de l'équation de la convection-diffusion dans le cas d'une injection ponctuelle instantanée d'un contaminant. La continuité d'un déversement en mer s'obtient alors par sommation d'une infinité de sources ponctuelles. Cette méthode de calcul se heurte cependant à deux difficultés principales néanmoins résolues dans le logiciel utilisé. La première tient à la très forte anisotropie de la dispersion, du fait des convections différentielles dans les écoulements considérés. La diffusion longitudinale, dans la direction définie par la vitesse d'écoulement, est 20 à 25 fois supérieure à la diffusion dans la direction perpendiculaire. Or, la vitesse d'écoulement dans le milieu marin varie en direction. La seconde difficulté tient à la discrétisation obligatoire dans un calcul numérique, alors qu'un rejet réel est parfaitement continu dans le temps. Ces deux difficultés sont surmontées dans le logiciel utilisé. La première par un traitement matriciel convenable de l'équation de la diffusion, la seconde par une intégration analytique exacte sur la durée du pas de temps de calcul.

Ce programme s'appliquait bien au cas de Bombay, dans la mesure où, la côte étant relativement rectiligne, les courants de marée variaient assez peu dans la zone d'influence du rejet. La composante principale des courants était d'ailleurs parallèle au rivage, avec toutefois une légère dérive vers la côte (plus ou moins influencée par les vents dominants).

Les différents calculs effectués, tant en ce qui concerne les pertes de charge que les concentrations à la côte, ont montré qu'un diffuseur de 44 orifices de 0,30 m chacun, disposés sur une longueur d'environ 1 380 m (soit un espacement moyen de 32 m entre chaque orifice) était globalement satisfaisant.

3. Etude de la centrale thermique et de dessalement d'Assir

Ce complexe est situé en Arabie Saoudite, sur le bord de la mer Rouge, à environ 100 km au Nord-Ouest de Giza (cf. fig. 2 et 3). Propriété de la Saline Water Conversion Corporation, il a été étudié par Electrowatt Engineering Services. Sa construction, commencée en 1985, a été confiée à un consortium Pegel Arabia, Envirogenics System Company, Korean Heavy Industries and Construction. Ce consortium a fait appel à SOGREAH pour des études hydrauliques destinées à préciser et finaliser le dimensionnement de la partie maritime du projet.

2. Centrale thermique d'Assir. Plan de situation.

3. Centrale thermique d'Assir. Schéma de principe des installations de prise et de rejet.

Dans une première phase, SOGREAH est intervenue sur le site pour une campagne de reconnaissances complémentaires et la mise en place d'appareils de mesures en continu des conditions océanographiques et météorologiques, assez mal connues jusqu'à présent. Ces reconnaissances et campagnes de mesures concernaient la bathymétrie, les courants, la marée, le vent, la houle, la salinité, la température, la qualité de l'eau, etc. Un biologiste a également effectué régulièrement des missions pendant un an afin de réaliser un suivi du cycle biologique du site.

Dans une seconde phase, SOGREAH a effectué un ensemble d'études sur plans, sur modèles mathématiques et sur modèles physiques, afin de préciser les différentes caractéristiques des ouvrages maritimes ayant une influence sur le bon fonctionnement du projet :

- Les statistiques de houle au large du site ont été calculées (en raison de l'absence d'enregistrements de longue durée au moment de l'étude), sur la base de mesures de vent sur 10 ans à Gizan ; les statistiques de houle (amplitude, direction, période) à l'emplacement même des ouvrages en ont été déduites après une étude sur modèle mathématique de la réfraction des houles entre le large et la côte.
- L'impact sédimentologique des ouvrages sur le littoral sableux du site a été étudié sur plans et calculé en fonction des conditions océanographiques après une mission d'expertise sédimentologique sur le site.
- Le risque d'ensablement de la prise d'eau sous l'action des houles et des courants, phénomène plus localisé que le précédent, a été étudié sur un modèle physique à trois dimensions de la prise d'eau ; le principe de cette étude consiste à mesurer des quantités de dépôts de sciure de bois (représentatif du sable à l'échelle) en fonction de différentes conditions de houle et de courant.
- Les modifications des fonds marins sous l'action des houles et des courants à proximité immédiate des ouvrages ont été étudiées sur le même modèle physique.
- Ce modèle a enfin permis de vérifier que l'agitation à l'intérieur du canal de prise et du port de service était inférieure aux limites requises.
- L'érosion des fonds marins sous l'action du rejet a été étudiée sur un second modèle physique à trois dimensions ; un système de protection efficace a été mis au point.
- La dilution thermique et saline autour du rejet (champ proche) a été étudiée sur le même modèle physique.
- Un modèle mathématique du champ proche (permettant l'étude d'un plus grand nombre de conditions opératoires) a été calé sur les résultats du modèle physique. Il a permis de définir les conditions limites du champ lointain et les risques de recirculation directe de l'eau plus chaude et plus salée entre le rejet et la prise.
- Un modèle mathématique bidimensionnel, réglé sur les mesures faites sur le site, a défini les champs de courant en fonction des différentes conditions océanométéorologiques ; un modèle mathématique de diffusion-convection calé sur le modèle précédent a permis l'étude de la recirculation dans le champ lointain.

- Un modèle paramétrique a fait la synthèse des statistiques des conditions météorologiques, des résultats des modèles de champ proche et de champ lointain, pour fournir les probabilités hivernales, estivales et annuelles de recirculation de l'eau chaude et salée entre le rejet et la prise ; les longueurs respectives du rejet et de la prise ont ainsi pu être optimisées.

- Les risques de vortex aux pompes de la station de pompage ont été éliminés par des modifications étudiées sur un troisième modèle physique à trois dimensions.

- Enfin, la stabilité des ouvrages de la prise sous l'action des houles a été vérifiée lors d'essais en canal à houle.

Cette description générale montre que les études effectuées ont abordé quasiment tous les problèmes liés à la prise et au rejet des eaux de refroidissement. Les études de recirculation de ces eaux de refroidissement seront plus spécifiquement détaillées ci-après.

3.1. Etude du champ proche

Deux types d'approche ont été considérés :

- une étude sur modèle physique ;
- un modèle mathématique calé sur les résultats obtenus avec le modèle physique et permettant de simuler un plus grand nombre de conditions opératoires.

Le modèle réduit physique était installé dans un bassin à houle multidirectionnelle de SOGREAH, équipé :

- D'un générateur de houle à éléments orientables, permettant de reproduire de la houle régulière et irrégulière.
- Des cellules à courant.
- D'un système de réchauffement et de salination des eaux de rejet. Ce système était composé d'une chaudière permettant de chauffer les eaux à une température déterminée, et d'un appareillage d'introduction d'une solution saline à concentration connue, de façon à obtenir la densité voulue pour les effluents rejetés. Un système d'asservissement permettait d'assurer une différence de température constante entre l'eau ambiante du modèle et les eaux rejetées, tandis que la salinité était ajustée au moyen d'une vanne de réglage située sur le circuit d'injection de la solution saline.
- De sondes de température et de salinité, dont les signaux étaient traités, en temps réel, à l'aide d'une centrale d'acquisition de mesures HP 1000. Ces sondes étaient fixées sur des supports mobiles, qui pouvaient être placés en différents points du modèle.
- D'une sonde capacitive de mesure de la houle.
- D'un courantomètre portable LPM 600, de 15 mm de diamètre, permettant la mesure de vitesses de courant de l'ordre de 2 à 3 cm/s (échelle modèle).

Le modèle physique était non distordu, à l'échelle du 1/50. La similitude de Froude était respectée et les nombres de Reynolds des écoulements étaient suffisamment élevés, pour qu'il n'y ait pas de problèmes induits par la viscosité.

Pour les essais de recirculation, d'autres lois de similitude intervenaient :

- Le nombre de Froude densimétrique, qui traduit la relation entre forces d'inertie et forces de flottabilité. Cette similitude est respectée avec un modèle en similitude de Froude classique.

- La dispersion induite par la turbulence des écoulements. Les relations entre coefficients de dispersion turbulente, dans les plans horizontaux et verticaux, impliquent que le modèle ne soit pas distordu. Une distorsion du modèle entraînerait une diminution du coefficient vertical et une augmentation du coefficient horizontal.

- Les lois d'échange avec l'atmosphère. Sur un modèle non-distordu, le coefficient d'échange avec l'atmosphère est en principe plus important que dans la réalité. Cependant, il ne faut pas oublier que le vent, même faible dans la nature, augmente ce coefficient de façon importante, alors que sur le modèle le vent n'est pas pris en compte. Il s'ensuit que la perte de chaleur due aux échanges avec l'atmosphère n'est peut-être pas aussi importante sur le modèle que l'on pourrait le supposer. De plus, dans le champ proche, les échanges avec l'atmosphère n'interviennent que secondairement dans la dilution du jet.

On peut aussi noter que, le modèle ayant servi également à étudier l'affouillement induit par les vitesses de sortie du rejet, des lois de similitude de déplacement des matériaux avec les courants et les vagues ont également été utilisées.

Pour les essais de recirculation, différentes conditions hydrauliques ont été testées, correspondant à différents niveaux de la mer, champs de courant, directions et hauteurs de la houle, densité du rejet. Le débit du rejet était fixe et égal à $17,7 \text{ m}^3/\text{s}$. La figure 4 montre un des résultats obtenus (ces résultats sont présentés sous forme de courbes d'égale dilution).

Le modèle physique servait à reproduire quelques cas (parmi les plus défavorables), de façon à pouvoir caler le modèle mathématique de recirculation du champ proche et également à déterminer l'influence de la houle, ce dernier paramètre n'étant pas inclus dans les modèles mathématiques.

Le modèle mathématique de champ proche est le modèle JETSURF (cf. fig. 5), qui permet de calculer le comportement tridimensionnel d'un jet à flottabilité positive ou neutre, en supposant une répartition gaussienne des profils de vitesse et de variation de la densité.

Ce programme résout les équations de quantité de mouvement, de continuité et de conservation d'un scalaire passif, en tenant compte de la topographie des fonds marins et de l'influence des forces de frottement et de traînée dues respectivement au vent et au courant. Il est à remarquer que la vitesse et la direction du courant sont constantes sur l'ensemble de la zone. Dans le cas où la vitesse du courant varie dans le temps (cas de la marée), on est obligé de définir des états permanents intermédiaires correspondant à des instants particuliers de la marée.

Comme indiqué précédemment, il a été nécessaire de régler le modèle mathématique avec les résultats du modèle physique. Pour cela, différents coefficients expérimentaux

4. Centrale thermique d'Assir. Exemple de résultats obtenus avec le modèle réduit physique de champ proche.

5. Modèle JETSURF. Schéma de définition.

intervenant dans les équations (coefficients d'entraînement, coefficient de frottement sur le fond, coefficient de traînée) ont été ajustés jusqu'à obtenir une assez bonne adéquation avec les mesures sur modèle physique. Les figures 6 et 7 (page suivante) présentent un certain nombre de comparaisons entre valeurs mesurées et valeurs calculées.

A partir de là, différentes situations journalières types ont été choisies parmi les cas de calcul effectués avec le modèle de calcul du champ des courants (cf. paragraphe 3.2 ci-après). Il a pu être ainsi mis en évidence que :

- les risques de recirculation directe du champ proche vers la prise d'eau sont inexistantes, excepté en cas de vent de SSE ;

- la plus grande partie du mélange avec les eaux ambiantes se situe dans les 400 à 500 m du point de rejet.

6. et 7. Centrale thermique d'Assir. Exemples de résultats obtenus avec le modèle JETSURF et comparaison avec les résultats du modèle réduit physique.

8. Centrale thermique d'Assir. Emprise des modèles de courant (CYTHÈRE-ES1) et de convection-diffusion (ARGOS).

9. Centrale thermique d'Assir. Réglage du modèle de courant.

3.2. Etude du champ lointain

Cette étude avait pour but :

- de définir, de façon précise, le champ des courants au voisinage de la prise et du rejet, pour différentes conditions météorologiques (vent), de marée et de niveau moyen de la mer ;
- de déterminer, pour différentes conditions opératoires de la centrale (débit de rejet, température et salinité des eaux rejetées) et avec les différents champs de courant obtenus précédemment, les possibilités de recirculation des eaux entre le rejet et la prise.

Le premier point nécessite l'utilisation d'un code de calcul hydrodynamique : le code CYTHÈRE ES1. Ce programme a fait l'objet de nombreuses publications, que l'on pourra consulter (cf. références [3] à [7]) pour une description détaillée. Il suffit ici de rappeler que ce système de modélisation permet de simuler les courants induits par le vent et la marée dans les zones côtières avec bancs découvrants. La simulation est fondée sur les équations bidimensionnelles de Saint-Venant, en séparant les termes propres à la convection, à la diffusion et à la propagation. La méthode de calcul utilisée permet une grande précision dans le traitement numérique et l'emploi d'un nombre de courant élevé (choix d'un pas de temps assez grand).

Ce programme, élaboré en commun par SOGREAH et par le LNH-EDF, a déjà été utilisé de nombreuses fois pour des études de rejets thermiques, de pollution, sédimentologiques, etc. Il a récemment été adapté, dans le cadre de l'étude de l'estuaire de la Seine, afin de prendre en compte l'influence de digues submersibles dans les écoulements à marée (cf. réf. [8]).

Pour l'étude d'Assir, la technique des modèles emboîtés a été utilisée et quatre modèles, couvrant différentes surfaces ont été successivement employés (cf. fig. 8) :

- Le modèle S couvre une aire de 59 km par 23 km et a servi surtout à obtenir de bonnes conditions aux limites pour les autres modèles.
- Le modèle A, de 15,1 km par 7,4 km, permet de calculer les courants pour différentes conditions météorologiques et de marée. La maille de calcul utilisée étant relativement large (de 200 à 500 m), ce modèle a été surtout utilisé dans le but de sélectionner les cas critiques de recirculation.
- Le modèle B couvre la même surface que le modèle A, mais la maille de calcul est beaucoup plus réduite (de 50 à 200 m). C'est avec les résultats de ce modèle, que la plupart des champs de température et de salinité ont été calculés pour les cas précédemment sélectionnés.
- Le modèle C, de 3,9 km par 4,4 km, permet une simulation beaucoup plus fine des écoulements autour de la prise d'eau. Les modifications apportées à la configuration de celle-ci peuvent ainsi être étudiées de façon beaucoup plus précise.

Les cas de calcul, pour le modèle hydrodynamique ont été tout d'abord sélectionnés en fonction des conditions océano-météorologiques les plus fréquentes régnant sur le site. La combinaison des différents niveaux moyens de la

mer, des types de marée (morte-eau, vive-eau) et des séquences de vent (hiver, été) ont amené à choisir 15 situations types, susceptibles d'être rencontrées au cours d'une année moyenne.

Pour ces différentes conditions, les champs des courants ont été calculés avec le modèle A sur une période de temps de l'ordre de 25 heures (deux cycles de marée successifs) après que le modèle ait été réglé au moyen des mesures disponibles (cf. fig. 9). Afin de déterminer les cas susceptibles de donner lieu ou non à une recirculation, des trajectoires de particules d'eau lâchées depuis le rejet ont été suivies pendant une période de 72 heures (le champ des courants calculé sur 25 heures a alors été répété trois fois successivement). La figure 10 donne un exemple des trajectoires obtenues.

Cinq situations types ont été ainsi sélectionnées et ont fait l'objet d'une détermination du champ des températures et des salinités. Dans ce but, le programme ARGOS a été utilisé. Ce code de calcul a, lui aussi, fait l'objet de publications (cf. réf. [9] et [10]). Rappelons que ce programme calcule le déplacement et la dilution d'une pollution quelconque supposée homogène sur la verticale, sur un maillage où l'évolution du champ des courants dans le temps est connue. Pour ce faire, ARGOS intègre les équations différentielles de convection-diffusion, en tenant compte (si nécessaire) de lois de déperdition pour les polluants non conservatifs (échange avec l'atmosphère ou décroissance bactérienne, par exemple) et d'éventuels termes sources ou puits. L'algorithme développé par SOGREAH utilise la même technique d'éclatement d'opérateurs que pour le programme CYTHÈRE. La résolution de la partie convection utilise une méthode des caractéristiques avec un schéma d'interpolation bicubique de Hermite. La partie diffusion est résolue à l'aide du schéma aux différences finies implicite de Crank-Nicolson. Cet algorithme permet de s'affranchir de la diffusion numérique qui apparaît dans les méthodes classiques de traitement des termes convectifs. Une procédure spécifique permet de traiter différemment les tâches de dimension inférieure à la maille.

Une autre procédure permet également, si on le désire, de n'effectuer que le calcul de trajectoires. Le champ des courants obtenu avec CYTHÈRE peut être utilisé directement avec le programme ARGOS.

Des exemples de résultats obtenus avec ce modèle sont montrés sur la figure 11. Notons que, pour obtenir ces champs de température et de salinité, il a fallu recalculer le champ des courants au moyen du modèle B (cf. fig. 12) et simuler l'évolution des concentrations sur une période de l'ordre de 100 h. Signalons que différentes conditions opératoires de la centrale ont été aussi testées avec le modèle B.

Enfin, le modèle C a permis de comparer entre-elles, de façon précise, différentes configurations de la prise d'eau, tant sur le plan hydrodynamique que sur le plan recirculation.

Grâce à cette étude du champ lointain, il a donc été possible :

- de séparer les situations océano-météorologiques en différents groupes, suivant le comportement hydrodynamique des eaux de rejet et les risques de recirculation ;
- de quantifier les variations de température et de salinité

10. Centrale thermique d'Assir. Exemple de calculs de trajectoires de particules d'eau.

11. Centrale thermique d'Assir. Exemple de résultats obtenus avec le modèle ARGOS.

12. Centrale thermique d'Assir. Champ des courants.

LENGTHENING OF JETTIES. (M)	WATER DEPTH (M) 50M. IN FRONT OF THE BREAKWATER (after bathymetry of 1985-86)
0.	5.10
50.	5.40
100.	5.60
150.	5.80
200.	6.00
250.	6.30
300.	6.80
360.	7.60

VARIATIONS OF THE TIME FREQUENCIES WITH RESPECT LENGTHENING OF INTAKE JETTIES.

13. Centrale thermique d'Assir. Courbes de fréquence pour différentes longueurs d'allongement de la prise.

que l'on est susceptible d'obtenir à la prise en cas de recirculation ;

- de tenir compte des différentes conditions opératoires de la centrale au cours de l'année ;
- de tester et comparer différentes configurations de la prise d'eau (par exemple fermeture de la passe Est, prolongement des digues de protection, déplacement du rejet).

3.3. Modèle paramétrique

Les calculs avec les modèles précédemment décrits étant relativement coûteux, il est apparu intéressant d'étudier l'influence de certaines modifications (faibles) des paramètres (comme par exemple, le débit de rejet, la température et la salinité du rejet, etc.) au moyen d'un modèle paramétrique.

Ce modèle est en effet basé sur les équations de bilan de quantités d'eau, de chaleur et de sel, en tenant compte des échanges entre le champ proche, le champ lointain, la mer ouverte et l'atmosphère. Les solutions de ces équations donnent les variations de température et de salinité au

droit de la prise, en fonction d'un certain nombre de coefficients caractéristiques des échanges entre les différentes zones. Ces coefficients sont évalués pour les différentes situations météorologiques prévalant sur le site au cours de l'année et réglés en fonction des résultats obtenus avec les modèles précédents.

En pondérant les valeurs obtenues avec le modèle paramétrique par des coefficients fonction de la fréquence d'apparition de chaque situation (vent, houle, conditions opératoires de la centrale, ...), il est possible de connaître les pourcentages de dépassement sur une année moyenne des valeurs de température et de salinité que l'on s'est fixées *a priori* au droit de la prise.

La figure 13 donne les courbes de fréquence obtenues pour différentes longueurs d'allongement de la prise.

Compte tenu des contraintes minimales imposées pour la recirculation (accroissement de température supérieure à 1 °C moins de 10 % du temps et accroissement de salinité inférieure à 2 g/kg), un accroissement de longueur des jetées de 250 m, couplé avec une fermeture de la passe Est, a été recommandé.

CONCLUSION

Cet exposé montre que l'étude des problèmes de dispersion des polluants passe par une connaissance approfondie de l'hydrodynamique du milieu récepteur (avant et après aménagements), de l'hydraulique des écoulements (conditions de rejet) et du comportement des polluants sous l'effet de différentes sollicitations.

Signalons, enfin, que des outils spécifiques peuvent également être utilisés pour ce qui concerne les problèmes d'eutrophisation (programme SIMULACRE), les problèmes de renouvellement des eaux dans les estuaires et les lagunes (programme STRATEST) ou les écoulements dus au vent (programmes EOLE, CREOLE).

Références

- [1] « Marine Outfall Systems, Planning, Design and Construction », R.A. Grace, Prentice-Hall, 1978.
- [2] SOGREAH. — *Etude des rejets urbains. Logiciel de calcul des jets et panaches*. Septembre 1988. R 6 0087-2 (pour le compte de l'IFREMER).
- [3] « The CYTHÈRE ES1 2D modelling system applied to complex estuarine and lake problems ». S. SCHWARTZ-BENEZETH et USSEGLIO-POLATERA J.M. *IARH*. Août 1985. 21^e Congrès.
- [4] « Le système CYTHÈRE ES1 pour les simulations des courants dus à la marée et au vent ». S. SCHWARTZ-BENEZETH et USSEGLIO-POLATERA J.M. *CEIFICI*. Octobre 1984.
- [5] « Two-dimensional modelling of wind-induced currents in coastal and harbour areas ». L. HAMM, B. QUETIN, J.M. USSEGLIO-POLATERA, *International conference on numerical and hydraulic modelling of ports and harbours*, 23-25 avril 1985.
- [6] « Numerical modelling of the interactive influence of wind, waves and tides on currents in shallow water ». J.M. USSEGLIO-POLATERA, P. GAILLARD, L. HAMM. *International Conference on computer modelling in ocean engineering*. Venice. 19-23 septembre 1988.
- [7] « New method for tidal current computation ». J.P. BENQUE, J. CUNGE, J. FEUILLET, A. HAUGUEL, F. HOLLY. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean division, ASCE*, vol. 108, n° WW3, août 1982.
- [8] « Numerical modelling of submersible dikes in tidal flows ». J.M. USSEGLIO-POLATERA et L. HAMM (article à paraître).
- [9] « Dispersion simulation in two dimensional tidal flow ». F. HOLLY, J.M. USSEGLIO-POLATERA, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 110, n° 7, juillet 1984.
- [10] « Méthodes de modélisation du transport et de la dispersion de polluants rejetés en mer ». B. QUETIN, J.M. USSEGLIO-POLATERA, *SHF*, septembre 1984.