

Méthode et outils pour la modélisation de la dilution des rejets d'usine de dessalement d'eau de mer

Jean Bougis

Ingénieur Conseil, 32-34 Chemin du Moulin, 06650 OPIO, France

jean.bougis@wanadoo.fr

Résumé : Les études de conception du rejet en mer de la saumure d'une usine de dessalement incluent les modélisations numériques de la dilution et de la dispersion de l'effluent dans le milieu récepteur. Les phénomènes physiques à modéliser dépendent des caractéristiques du rejet (débit, vitesse, masse volumique, etc.) et du milieu marin (courant, agitation, etc.) ; la classe de modélisation pertinente aussi. Cet article décrit les différents phénomènes physiques, présente les différentes classes de modélisations envisageables et les types de logiciels adaptés aux circonstances et propose un guide pour orienter le choix des modélisations à réaliser en s'appuyant sur des exemples concrets.

Abstract: The design studies of sea outfall of the brine of a desalination plant include the numerical modeling of dilution and dispersion of the effluent in the receiving environment. The physical phenomena to achieve depend on the characteristics of the discharge (flow, speed, density, etc.) and marine middle (current, agitation, etc.); the relevant type of modeling too. This article describes the different physical phenomena, shows the different class of possible models and software types appropriate to the circumstances and provides a guide for choosing the modeling to perform based on concrete examples.

Mots clés : dessalement d'eau de mer, saumures, rejet en mer, modèle numérique, courantologie, jets noyés, panaches, transport de contaminant.

Key words: sea water desalination, brine, sea outfall, numerical model, currentology, submerged jets, plume, contaminant transport.

1 Motivation

Les carences en eau douce naturellement disponible engendrent une augmentation très sensible des besoins en dessalement d'eau de mer. La multiplication des usines de dessalement, nécessaire pour répondre localement à la demande tout en minimisant les transports d'eau dessalée et en utilisant des productions d'énergie locales, induit une multiplication des points de rejet des saumures en quantités relativement faibles de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de litres par seconde.

La multiplication des émissaires de rejet à la mer représente un coût important susceptible de constituer un frein au développement de la ressource en eau. Il convient donc de mener les études de rejet de manière à optimiser les dispositifs d'évacuation des saumures à la mer. Pour cela des modélisations numériques sont indispensables.

Cependant, les modélisations numériques des études environnementales représentent elles-mêmes des coûts non négligeables vis-à-vis des études de maîtrise d'œuvre et plus encore vis-à-vis des études de faisabilité. Il convient donc d'en optimiser les coûts en réalisant soigneusement les modélisations nécessaires et utiles mais en évitant les modélisations superflues ou inutiles.

Nous nous sommes donc fixé pour objectif de préciser les phénomènes physiques à modéliser en fonction des caractéristiques du rejet (débit, vitesse, masse volumique, etc.) et du milieu marin (courant, agitation, etc.) et d'en déduire la classe de modélisation pertinente. Il convient également à définir les types de logiciels adaptés aux circonstances et de proposer un guide pour orienter le choix des modélisations à réaliser en s'appuyant sur des exemples concrets.

2 Seuil de salinité « acceptable »

Pour une eau de mer de salinité $S_m=37$ g/kg et pour un taux de conversion de 45%, l'effluent aura une salinité de $S_e=67$ g/kg. Le rejet de l'effluent constitue donc manifestement une source de contamination. En absence de définition d'un seuil légalement autorisé, les impacts admissibles de ces rejets doivent être analysés à la lumière de leurs effets concrets sur la vie marine.

Pour la plupart des espèces animales et végétales marines, la salinité létale est comprise entre 50 g/kg et 70 g/kg ; tandis qu'une salinité inférieure à 40 g/kg est généralement sans effet (Shunya *et al.* 1994 [SHU94]). Dans la plupart des cas, il conviendra donc d'obtenir le plus rapidement possible une dilution supérieure à 10 fois ; et si possible avant que le rejet ne touche sur le sol marin.

Il faut à ce sujet, garder présent à l'esprit l'exemple de l'usine de dessalement d'Alicante en Espagne où le suivi du rejet à la côte a montré que, même si le mélange est relativement efficace à proximité de l'exutoire, un nuage salin stable, dont la salinité est au moins de 0.5 g/kg au-dessus de celle de l'eau de mer, se propage à une distance d'environ 4 km, en hiver sur le fond et en été au niveau de la thermocline (Fernández-Torquemada 2005 [FER05]).

Cette concentration, qui est de l'ordre des variations saisonnières et spatiale sur la hauteur de la lame d'eau de la salinité de l'eau de mer, est généralement considérée comme une limite acceptable ; elle correspond à une dilution de l'ordre de 60 fois. Ainsi, dans la plupart des cas, il conviendra donc d'obtenir le plus rapidement possible une dilution supérieure à 10 fois ; et si possible avant que le rejet ne touche sur le sol marin

3 Phénoménologie

Le débit volumique Q_V du rejet en mer de l'effluent d'une usine de dessalement est fixé par le processus en fonction du débit d'eau douce produite et du taux de conversion.

La masse volumique de la saumure dépend de la salinité et de la température :

➤ vers 20°C, une salinité de 37 g/kg induit une masse volumique $\rho_m=1027$ kg/m³,

➤ vers 20°C, une salinité de 67 g/kg induit une masse volumique $\rho_e=1050 \text{ kg/m}^3$.

Le débit de masse $Q_M = \rho_e Q_V$ en résulte.

Le débit volumique et la section S de l'exutoire de l'émissaire imposent la vitesse de soufflage (sortie de l'effluent) : $U=Q_V/S$; le débit de quantité de mouvement $Q_Q = Q_M U = \rho_e Q_V^2/S$ en résulte.

3.1 Différentes zones d'écoulement

A la sortie de l'émissaire, l'écoulement de l'effluent dans le fluide ambiant est essentiellement conditionné par ses débits de masse et de quantité de mouvement ; il relève de la théorie des jets noyés. La différence de vitesse à l'interface entre l'effluent et le fluide ambiant provoque un cisaillement qui engendre une turbulence responsable du mélange entre les deux fluides. Le jet absorbe donc un certain débit de fluide ambiant, ce qui tend à diluer l'effluent et à uniformiser le champ de vitesse. L'absorption de fluide ambiant par le jet et la réduction de vitesse relative entre l'effluent et le fluide ambiant imposent une ouverture progressive du jet. La différence de masse volumique entre l'effluent et le milieu ambiant, éventuellement influencée par la différence de température, incurve le jet dans le plan vertical.

Au-delà d'une certaine distance, la quantité de mouvement est homogénéisée, mais la masse volumique ne l'est pas encore. Le différentiel de vitesse devient trop faible pour pérenniser ce type de comportement. L'écoulement cesse, plus ou moins progressivement, d'être essentiellement gouverné par le débit de quantité de mouvement et c'est la différence de masses volumiques due aux différences de température et de salinité qui prend le dessus. L'écoulement du type jet noyé cède la place à un écoulement de type panache gravitaire. L'effluent étant plus dense que l'eau de mer, le panache descend vers le fond. L'existence d'un gradient de masse volumique du milieu ambiant, comme c'est le cas en présence d'une thermocline ou d'une halocline, peut perturber le comportement du panache, voire en bloquer la descente.

Encore plus loin, la dilution dans le milieu ambiant de la quantité de mouvement et de la masse volumique de l'effluent est suffisamment importante pour que l'écoulement du milieu ambiant ne soit plus perturbé par l'effluent qui est alors simplement transporté, au gré du fluide ambiant, comme une tache qui s'étale sous les effets de la diffusion moléculaire et surtout de la diffusion turbulente. L'écoulement du type panache gravitaire a cédé la place à un écoulement de type panache transporté au fond.

Si la profondeur n'est pas trop grande, sous l'action des courants et de la diffusion turbulente, le panache tridimensionnel s'épaissit progressivement jusqu'à intéresser le fluide ambiant sur toute la profondeur et devenir un panache bidimensionnel dans le plan horizontal et homogène sur l'axe vertical. L'écoulement du type panache tridimensionnel a cédé la place à un écoulement de type panache bidimensionnel transporté.

Ainsi, au fur et à mesure de la dilution des grandeurs physiques attachées au rejet (quantité de mouvement, température, salinité, masse volumique) qui accompagne l'accrois-

sement de la distance à l'exutoire, on distingue successivement trois zones dans lesquelles l'évolution du rejet n'est pas gouvernée par les mêmes lois physiques.

- 1) Un champ proche dans lequel l'écoulement est du type jet noyé ou panache gravitaire. Ce phénomène se manifeste sur des distances de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, à une échelle de temps de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.
- 2) Un champ intermédiaire dans lequel l'écoulement est du type tache transportée au fond. Ce phénomène se manifeste sur des distances de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, à une échelle de temps de quelques dizaines de minutes à quelques heures.
- 3) Un champ lointain dans lequel l'écoulement est du type panache bidimensionnel transporté. Ce phénomène se manifeste sur des distances de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, à une échelle de temps de quelques jours à quelques dizaines de jours.

Les étendues en plan de ces différentes zones sont évidemment liées à la profondeur d'eau, à la complexité de la bathymétrie (fond plan ou en pente, existence de canyons ou d'obstacles, etc.) et aux différences de caractéristiques physiques entre l'effluent et le milieu ambiant. Elles sont distordues lorsque le fluide ambiant est le siège d'un courant. Des recouvrements ou des interpénétrations de ces zones peuvent résulter des transports des nappes plus ou moins diluées par les courants oscillants et par l'agitation ambiante. Des stratifications, engendrées par un gradient de densité (pycnocline¹) dû à un gradient de température (thermocline) ou à un gradient de salinité (halocline) peuvent s'opposer au mélange sur l'épaisseur de la lame d'eau.

Les transitions entre ces différentes zones peuvent ainsi s'étendre sur des distances plus ou moins importantes. Selon le problème posé, ces zones présentent plus ou moins d'intérêt pour l'étude environnementale ; si bien que, selon les cas, cette étude pourra nécessiter la mise en œuvre de modèles numériques plus ou moins complexes : modèles mathématiques asymptotiques ou semi-asymptotiques, quasi analytiques tridimensionnels ou bidimensionnels, modèles numériques tridimensionnel ou modèles numériques tridimensionnels.

3.2 Champ proche

Le débit de quantité de mouvement du rejet, qui est contrôlé par la section de l'exutoire, dépend de sa charge dynamique qui résulte de la charge potentielle disponible, qu'elle soit gravitaire ou due à une station de refoulement, et des pertes de charges consenties.

- une éjection lente génère de faibles pertes de charge mais entrave la dilution ;
- une éjection rapide favorise la dilution mais génère de fortes pertes de charge.

Le champ proche est la zone dans laquelle le flux de quantité de mouvement du rejet n'est pas encore dilué. Il se subdivise en deux parties : avant et après le contact du jet avec une frontière du domaine (fond ou surface libre).

¹ Interface qui sépare deux couches de fluide de densités différentes.

Dans le champ proche, le mélange dépend de la différence de vitesse entre l'effluent et le milieu ambiant et donc du rapport entre le débit de quantité de mouvement et le débit de masse. Si ce rapport est grand, l'écoulement est du type jet noyé (l'effluent pénètre en jet dans le milieu ambiant et se mélange à lui) ; dans le cas contraire il est de type panache gravitaire. Comme la masse volumique de l'effluent est supérieure à celle du milieu ambiant, l'effluent descend et se répand sur le sol.

Dans le champ proche, l'écoulement est tridimensionnel. Tant qu'il n'a pas interaction avec une frontière du milieu ambiant (fond ou surface libre) ce dernier peut être supposé infini. L'hypothèse du milieu infini permet de recourir à des modèles asymptotiques du type « jets et panaches » pour simuler l'évolution du rejet autour de l'exutoire de l'émissaire et évaluer son impact au voisinage de ce point. Ce type de modèles permet la prise en compte d'un courant de vitesse u dans le milieu ambiant. Sous certaines hypothèses simplificatrices concernant l'évolution des différents paramètres (vitesse, concentration, température, etc.) dans la section du jet, il est possible d'étendre l'utilisation de ce type de modèles à des écoulements le long d'une surface plane et horizontale et de prendre ainsi en compte la présence de la surface libre ou du fond supposé plan et horizontal.

3.3 Champ lointain

Dans le champ lointain, le fluide est suffisamment homogène pour que les variations verticales de la concentration de l'effluent soient négligeables. L'effluent ne peut plus engendrer d'effet advectif selon l'axe vertical, si bien que l'hypothèse de la répartition verticale hydrostatique de la pression devient licite. Si l'écoulement dans le milieu ambiant est également suffisamment homogène, l'évolution de la concentration de l'effluent peut être suivie par un modèle de courantologie hydrostatique tridimensionnel ou bidimensionnel, selon les caractéristiques de l'écoulement ambiant, qui prend en compte les effets des frontières et toute la complexité des champs de courant liée aux cycles de marée et aux conditions climatiques. Ils permettent notamment d'estimer l'impact du rejet sur l'ensemble du milieu récepteur.

Ensuite, l'effluent n'ayant plus d'impact sur l'écoulement, l'équation d'advection diffusion qui exprime la conservation de la masse d'un traceur suffit pour suivre, en chaque point au cours du temps, la concentration des contaminants conservatifs apportés par l'effluent dans le fluide ambiant initial. Cette même équation, assortie d'une loi cinétique, permet de réaliser le suivi des contaminants non conservatifs (réactions chimiques, croissance et décroissance biologiques, etc.).

Un champ lointain dans lequel, si les courants sont homogènes sur la hauteur de la lame d'eau, l'écoulement est du type panache 2D plan transporté. Ce phénomène se manifeste sur des distances caractéristiques de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, à une échelle de temps caractéristique de quelques jours à quelques dizaines de jours.

3.4 Champ intermédiaire

Dans le champ intermédiaire :

- les interactions du panache avec les frontières (surface libre, fond) sont trop fortes pour permettre une approche asymptotique fondée sur l'hypothèse d'un milieu infini ou semi-infini.
- le mélange sur l'axe vertical est insuffisant pour que les variations verticales de concentration d'effluent puissent être négligées ; le suivi de la contamination relève d'un modèle tridimensionnel non hydrostatique ;

Dans ces conditions, la modélisation des écoulements relève de la résolution, dans l'espace tridimensionnel, des équations de Navier-Stokes-Reynolds. Les modèles de fermetures peuvent être plus ou moins sophistiqués (longueur de mélange, $k-\epsilon$, $k-\omega$ ou contraintes de Reynolds). Le modèle le plus simple, et sans doute le plus robuste, est fondé sur la longueur de mélange. Ce paramètre, qui correspond à l'échelle de longueur des grandes structures tourbillonnaires, doit être calé. Toutefois, pour des écoulements présentant une direction (curviligne) privilégiée, la longueur de mélange est liée au rayon hydraulique (rapport de la section du jet à son périmètre) ou au diamètre hydraulique (4 fois le rayon hydraulique) qui n'est autre que le diamètre du jet.

Dans de nombreux problèmes, l'intérêt de simuler les écoulements dans cette zone intermédiaire est relativement faible dans la mesure où les deux principales questions posées concernent :

- l'évolution du rejet dans le champ proche pour évaluer sa dilution au voisinage immédiat du point de rejet, et en déduire l'étendue de la zone directement affectée qui est souvent sacrifiée du point de vue faunistique et floristique ;
- l'évolution du rejet dans le champ lointain pour évaluer la capacité du milieu récepteur à l'absorber et à le disperser avant qu'il n'atteigne des zones sensibles.

Lorsque la profondeur d'eau est très grande et/ou très irrégulière au voisinage du rejet (tombants, falaises, canyons, etc.), ou que la différence de masse volumique entre l'effluent et le milieu ambiant est importante, ou que le milieu ambiant est trop peu agité pour engendrer une diffusion appréciable, le champ intermédiaire peut s'étendre sur une large zone. En effet, le jet initial rencontre alors rapidement le fond. Il s'écoule contre la frontière sur de longues distances avant que sa dilution soit suffisante pour que sa concentration puisse être négligée ou pour que le milieu devienne homogène. Dans ces configurations, ce qui se passe dans le champ intermédiaire n'est pas nécessairement intermédiaire entre les situations des deux champs proche et lointain et la modélisation ne peut qu'être tridimensionnelle. C'est souvent le cas pour les rejets de saumures des usines de dessalement qui peuvent engendrer des écoulements gravitaires sur de longues distances.

4 Modèles numériques

4.1 Modèles asymptotiques

4.1.1 Définition

Lorsqu'un problème de mécanique des fluides fait intervenir des paramètres adimensionnels très petits ou très grands, que ce soit dans les équations indéfinies, dans les conditions aux limites, dans les conditions initiales ou en relation avec la configuration physique du problème considéré, le modèle exact de Navier-Stokes peut recevoir de manière formelle et systématique des solutions analytiques en utilisant des passages à la limite appropriés (ZEYTOUNIAN 1994 [ZEY94]). Ces solutions analytiques constituent la classe des modèles asymptotiques analytiques.

Certains problèmes admettent des solutions asymptotiques qui ne sont pas totalement résolubles de manière analytique et qui doivent être finalisés en recourant à un calcul numérique. Ces solutions mixtes analytiques et numériques constituent la classe des modèles asymptotiques quasi-analytiques.

4.1.2 Modèle du jet noyé

L'observation du jet, à l'abscisse curviligne s assez grande devant le diamètre hydraulique² D_0 de l'exutoire, c'est-à-dire à une distance de quelques diamètres, permet de faire quatre remarques (LANDAU & LIFCHITZ 1971 [LAN 71]) :

- 1) Loin de l'exutoire, la forme du jet est indépendante de la forme concrète de l'exutoire, si bien que la section du jet est circulaire.
- 2) Le problème ne possède que deux longueurs caractéristiques indépendantes de D_0 : la distance curviligne s parcourue par les particules fluides du jet à partir de la sortie de l'émissaire, et le rayon $R(s, \mathbf{u})$ du jet à cette abscisse curviligne s . L'analyse dimensionnelle impose donc la proportionnalité entre les variations de ces deux longueurs : $dR(s, \mathbf{u}) \propto ds$; si bien que la région turbulente du jet est un cône curviligne dont le sommet (ou pôle du jet) est situé à l'intérieur de l'exutoire.
- 3) La constante de proportionnalité étant la même pour tous les jets, le demi-angle au sommet β du jet est, dans le repère entraîné par le fluide ambiant, indépendant du problème et ne dépend donc que du caractère turbulent du jet. L'expérience montre que β est compris entre $12,5^\circ$ et $16,5^\circ$, et reste généralement très voisin de 15° . Cette ouverture du jet peut être déformée et distordue soit par l'entraînement dû aux courants ou aux effets gravitaires, soit par la stratification du milieu ambiant.
- 4) La distribution de vitesse curviligne dans la section du jet résulte de la diffusion turbulente. Elle est donc sensiblement gaussienne. Elle est maximale sur l'axe du jet. L'expérience montre qu'elle est réduite de moitié à une distance de $0.35R(s, \mathbf{u})$ à $0.40R(s, \mathbf{u})$ de l'axe et de 99% sur le « bord » du jet (PADET 1991 [PAD 91]).

Ces différentes considérations permettent d'établir assez simplement un modèle général de comportement des jets, du moins tant que le fluide ambiant est stable et peut être considéré comme illimité, c'est à dire que le jet ne rencontre pas d'obstacle (parois, sur-

² Le diamètre hydraulique est égal à quatre fois le rayon hydraulique, qui est le rapport entre la section et le périmètre mouillé de la conduite (égal au diamètre pour une section circulaire).

face libre, etc.). Naturellement, ce genre de modèle asymptotique devient inopérant lorsque la vitesse du fluide ambiant ou les forces (essentiellement dues à des différences de masse volumique) qui agissent sur le jet le font revenir sur lui-même.

Le modèle asymptotique de jet turbulent peut être complété par des considérations physiques et des résultats expérimentaux pour permettre d'obtenir un comportement raisonnable au voisinage immédiat de l'exutoire. Il peut être étendu en modèle quasi-asymptotique au cas d'un champ de vitesse non uniforme au sein du fluide ambiant, à condition que les variations de ce dernier soient négligeables par rapport aux dimensions transversales du jet aux distances considérées.

4.1.3 Modèle de panache

Lorsque la quantité de mouvement du jet est suffisamment diluée, l'évolution du panache ne dépend plus que de la vitesse du courant du milieu ambiant et de la masse volumique du mélange entre les deux fluides. Cette masse volumique dépend des masses volumiques respectives du milieu ambiant et de l'effluent. Elle varie avec la dilution du flux de masse et du flux de quantité de chaleur de l'effluent.

4.1.4 Modélisation numérique

Les écoulements dans le champ proche peuvent être modélisés en intégrant de manière complète et continue les équations des jets et des panaches. L'écoulement dans le jet est alors défini à partir des caractéristiques suivantes :

- l'intensité turbulente du jet I_t (rapport entre la vitesse turbulente efficace et la vitesse relative moyenne au point considéré) est constante et a une valeur comprise entre 0.065 et 0.087 ;
- le demi-angle au sommet du jet β n'est fonction que de l'intensité turbulente I_t dans l'écoulement du jet : $R(s, \mathbf{u}) = R_0 + \text{tg } \beta \cdot s$ avec : $\text{tg } \beta = 3.4I_t$ et : $D_0 = 2R_0$;
- le demi-angle au sommet du noyau du jet β' n'est fonction que de l'intensité turbulente I_t dans l'écoulement du jet : $\text{tg } \beta' = 1.5I_t$;
- la répartition de la vitesse curviligne dans la section du jet est supposée gaussienne : $u(s, r) = u(s, 0) \exp(-ar^2/R^2)$;
- de même pour la concentration volumique d'effluent : $c(s, r) = c(s, 0) \exp(-ar^2/R^2)$;
- la répartition d'écart de température par rapport au fluide ambiant à la même cote z est également supposée gaussienne : $\Delta T(s, r) = \Delta T(s, 0) \exp(-ar^2/R^2)$;
- le rapport entre la vitesse moyenne dans la section du jet et la vitesse sur l'axe du jet est de l'ordre de 0.2, ce qui fixe la valeur du coefficient de dispersion de la loi de Gauss à 4.965 ; il est compris, de manière plus générale, entre 4.5 ($u(s, R) = 0.01u(s, 0)$) et 5.7 ($u(s, 0.35R) = 0.50u(s, 0)$).

Le problème de l'évolution du jet d'effluent dans le milieu ambiant comporte cinq inconnues fonctions de l'abscisse curviligne du jet qu'il convient de déterminer :

- la trajectoire de l'axe du jet qui se réduit à l'intégration des déplacements et donc à la détermination :
 - de l'angle $\theta(s)$ de déviation verticale entre la tangente à l'axe et le plan horizontal,

- de l'angle $\varphi(s)$ de déviation horizontale entre le plan vertical contenant la tangente à l'axe et le plan vertical contenant l'exutoire ;
- la vitesse curviligne du fluide $u(s,0)$;
- la concentration de l'effluent $c(s,0)$ (ou la dilution de l'effluent $d(s, 0) = 1/c(s, 0)$) ;
- l'écart de température $\Delta T(s, 0)$, à la cote z considérée, entre le fluide ambiant et le jet.

Etant donné qu'il y a cinq inconnues, il convient d'écrire cinq équations indépendantes qui concernent respectivement la conservation le long du jet :

- du flux de masse de l'effluent ;
- du flux de chaleur ;
- des trois composantes du flux de quantité de mouvement.

Les équations sont développées analytiquement puis intégrées numériquement le long de l'axe du jet (modèle quasi-asymptotique).

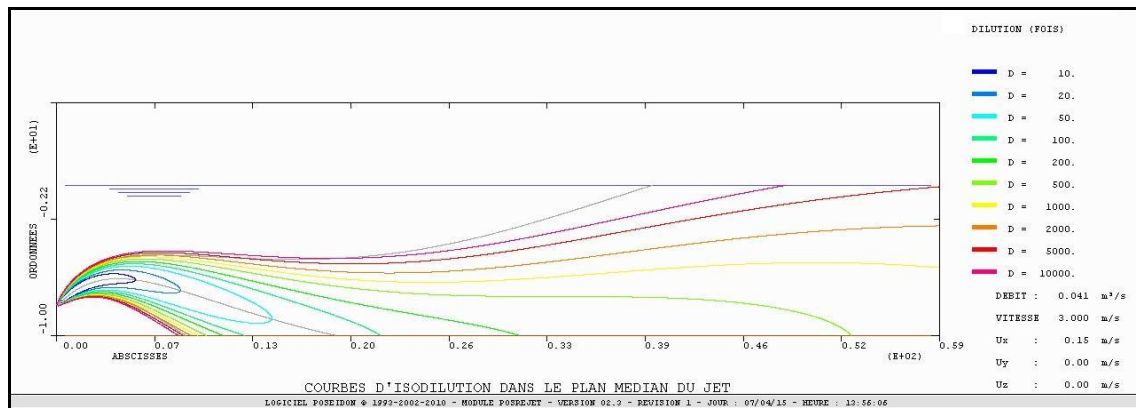


Figure 1 : Courbes iso-dilution pour un jet à 3 m/s à 45° dans un courant de 0.15 m/s

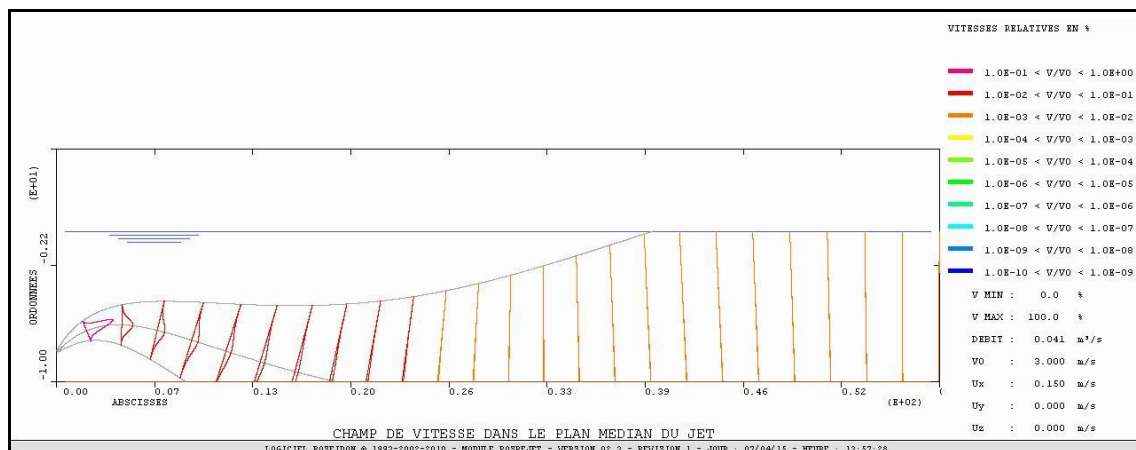


Figure 2 : Champ de vitesse pour un jet à 3 m/s à 45° dans un courant de 0.15 m/s

Les figures 1 et 2 présentent respectivement les courbes d'iso-dilution et le champ de vitesse pour un rejet d'un débit de 41 l/s avec un soufflage à 3 m/s incliné de 45° à 2 m au-dessus du sol dans une profondeur de 10 m.

Il apparaît que lorsque l'axe du jet rencontre le sol, la dilution est comprise entre 50 et 100 fois. Ainsi dans ce cas, sous réserve que la vitesse du courant de 0.15 m/s soit réaliste, il ne sert à rien de réaliser des calculs de champ intermédiaire ou lointain.

4.2 Modèles tridimensionnels non hydrostatiques

Les modèles de courantologie tridimensionnels non hydrostatiques sont les plus généraux. Ils résolvent les équations de la courantologie tridimensionnelle (Navier-Stokes-Reynolds) en prenant en compte les bilans de :

- la conservation de la masse,
- la conservation des trois composantes de la quantité de mouvement,
- la conservation de la chaleur,
- la conservation des différents contaminants.

Ils sont munis de modèles de turbulence qui assurent la fermeture des équations moyennées de Reynolds, sous une forme plus ou moins sophistiquée : longueur de mélange, transport $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$, contraintes de Reynolds.

Ces modèles permettent l'injection d'un flux de masse et d'un flux de quantité de mouvement dans les trois directions, et donc en particulier selon l'axe vertical (diffuseur non horizontal).

4.3 Modèles tridimensionnels hydrostatiques

Les modèles de courantologie tridimensionnels hydrostatiques reprennent les équations des modèles non hydrostatiques et résolvent les équations de la courantologie tridimensionnelle (Navier-Stokes-Reynolds) en négligeant la composante verticale de la quantité de mouvement. Ils prennent en compte les bilans de :

- la conservation de la masse,
- la conservation des deux composantes horizontales de la quantité de mouvement,
- la conservation de la chaleur,
- la conservation des différents contaminants.

Ils sont munis de modèles de turbulence qui assurent la fermeture des équations moyennées de Reynolds, sous une forme plus ou moins sophistiquée : longueur de mélange, transport $k-\varepsilon$ ou $k-\omega$, contraintes de Reynolds.

Ces modèles ne permettent que l'injection d'un flux de masse et d'un flux de quantité de mouvement dans les deux directions horizontales (diffuseur horizontal).

4.4 Modèle bidimensionnels

Les modèles de courantologie bidimensionnels supposent que toutes les grandeurs (vitesses, salinité, masse volumique, température, concentrations de contaminants, etc.) sont homogènes sur l'épaisseur de la lame d'eau. La pression est nécessairement hydrostatique.

Ils résolvent les équations de la courantologie bidimensionnelle (équations de Navier-Stokes-Reynolds moyennées sur la profondeur) en négligeant tous les échanges verticaux. Ils prennent en compte les bilans de :

- la conservation de la masse,
- la conservation des deux composantes horizontales de la quantité de mouvement,
- la conservation de la chaleur,
- la conservation des différents contaminants.

Ils sont généralement munis d'un modèle de turbulence qui assure la fermeture des équations moyennées de Reynolds de type longueur de mélange (ELDER 1959 [ELD59]).

Ces modèles ne permettent que l'injection d'un flux de masse et d'un flux de quantité de mouvement dans les deux directions horizontales homogène sur l'épaisseur de la lame d'eau (diffuseur horizontal homogène du fond à la surface libre).

5 Guide de modélisation

5.1 Design du diffuseur

Le design du diffuseur et de ses conditions de soufflage relève d'un modèle asymptotique qui permettra d'évaluer la distance à laquelle le jet atteint le sol en fonction de la hauteur au dessus du sol et de l'inclinaison de la buse, du débit et de la vitesse de soufflage de l'effluent.

5.2 Suivi de la tache de salinité

Le modèle asymptotique indique la concentration de l'effluent lorsqu'il atteint le sol :

- si la dilution est supérieure ou égale à 60 ou 100 fois et si le courant existe, la question est fermée ;
- si la dilution est inférieure à 60 ou 100 fois, la modélisation doit continuer.

Le modèle asymptotique permet également d'évaluer le flux de quantité de mouvement selon l'axe vertical :

- si elle n'est pas négligeable, la modélisation doit être poursuivie avec un modèle tridimensionnel non hydrostatique ;
- si elle est négligeable :
 - si toutes les grandeurs ne sont pas homogènes sur la profondeur la modélisation peut être poursuivie avec un modèle tridimensionnel hydrostatique.
 - si toutes les grandeurs sont homogènes sur la profondeur la modélisation peut être poursuivie avec un modèle bidimensionnelle hydrostatique.

En absence de recirculation vers le point de rejet, les modélisations s'arrêtent lorsque la salinité du panache est moins de 0.1 à 0.5 g/kg au-dessus de celle du milieu ambiant.

En cas de recirculation vers le point de rejet, les modélisations s'arrêtent après avoir obtenu une salinité du panache stable à moins de 0.1 à 0.5 g/kg au-dessus de celle du milieu ambiant.

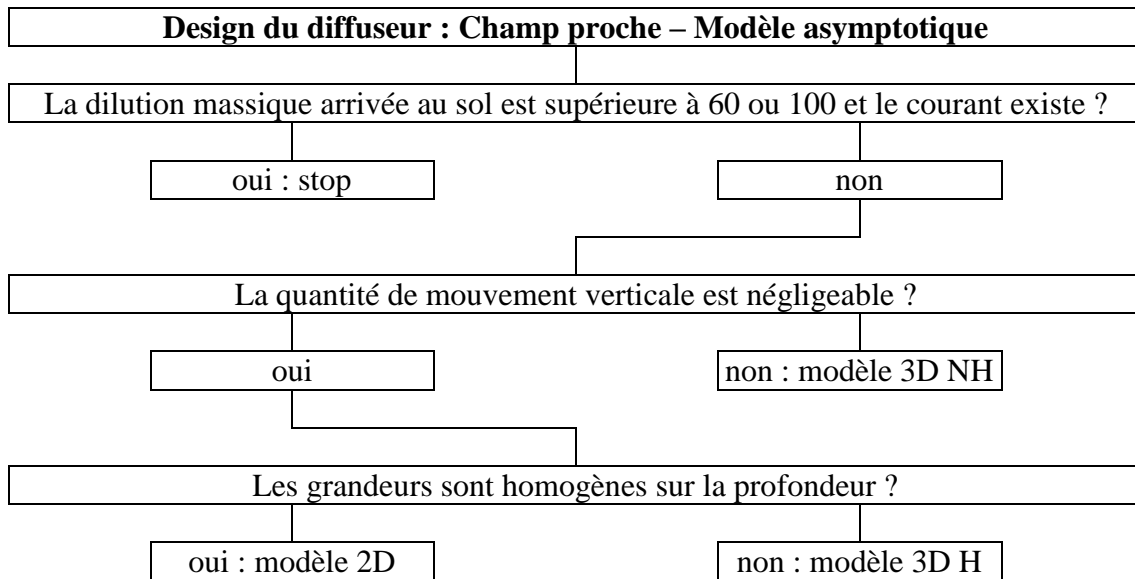


Figure 5.1 : Schéma des modélisations à effectuer

6 Conclusions

Les modèles asymptotiques sont souvent les plus performants pour analyser les conditions de soufflage à la sortie des exutoires des émissaires et pour définir les sections à retenir et les dispositifs particuliers à adopter, comme les valves élastomères de type « bec de canard ».

Le problème le plus important est souvent de s'assurer de la vitesse des courants au point de rejet.

7 Bibliographie

- [BOU74] Bougis J. (2014) *Prises d'eau et rejets en mer*, 624 p., Nantes : Paralia.
- [ELD59] Elder J.W. (1959) The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 5, n°4, p. 544-560.
- [FER05] Fernández-Torquemada Y., Sánchez-Lizaso J. L. & González-Correa J. M. (2005) Preliminary results of the monitoring of the brine discharge produced by the SWRO desalination plant of Alicante (SE Spain), *Desalination*, vol. 182, n°1-3, p. 395-402.
- [LAN 71] Landau L., Lifchitz E. (1971⁵) *Mécanique des fluides*, 669 p., Moscou : Mir.
- [PAD 91] PADET J. (1991) *Fluides en écoulement méthodes et modèles*, 359 p., Paris : Masson.
- [SHU94] Shunya I., Shiger S. and Ayako M. (1994), The lethal effect of hypertonic solutions and avoidance of marine organisms in relation to discharged brine from desalination plant, *Desalination*, vol.97, p. 389-399.
- [ZEY94] Zeytounian R.K. (1994) *Modélisation asymptotique en mécanique des fluides Newtoniens*, collection : Mathématiques et Applications n°15, 225 p., Paris : Springer-Verlag.