

## MODELISATION DE LA DISPERSION DU PHOSPHOGYPSE DANS LE GOLFE DE GABES

Bécher BEJAOUI<sup>1\*</sup>, S. RAIS<sup>2</sup> et V. KOUTITONSKY<sup>3</sup>

1 : Institut National des Sciences et Technologies de la Mer-28, rue 2 mars 1934, Salammbô, 2025 Tunis (Tunisie),

2 : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - BP 37, 1002 Tunis Belvédère (Tunisie).

3 : Institut des Sciences de la Mer-310, avenue des Ursulines Rimouski, Québec (Canada),

\*Bejaoui@webmails.com

### ملخص

**النمذجة الرقمية لانتشار الفوسفوجيبس في خليج قابس :** تهتم هذه الدراسة بنمذجة انتشار الفوسفوجيبس بخليج قابس المتأنية من المعامل الكيميائية بالجهة. وقد استعملنا لهذا الغرض النموذج الرقمي «CORMIX». في البداية، قمنا بتحليل مدى حساسية تغيير مركبات النموذج، ثم قمنا بثمانية نماذج لتحديد مدى انتشار التلوث في خليج قابس. لكل حالة مدّ وجزر قمنا بأربعة نماذج. بينت هذه الدراسة عن طريق النمذجة، أنّ التلوث بالفوسفوجيبس يمتدّ على مساحة قدرت بـ 60 كم<sup>2</sup>.  
**كلمات مفاتيح :** النمذجة الرقمية، انتشار، فوسفوجيبس، قابس

### RESUME

Ce travail porte sur la modélisation de la dispersion du phosphogypse émis par les industries chimiques dans le golfe de Gabès. Le modèle CORMIX, basé sur la théorie de l'analyse dimensionnelle, est utilisé dans le cadre de cette étude. Une analyse de la sensibilité des paramètres du modèle a d'abord été faite. Huit simulations ont été ensuite réalisées pour déterminer l'étendue spatiale de la pollution au niveau du golfe. Pour chaque condition de marée (marée haute, marée basse) quatre simulations ont été effectuées. Les résultats des simulations ont montré que la pollution par le phosphogypse s'étale dans l'espace sur une superficie de l'ordre de 60 km<sup>2</sup>.

**Mots clés:** Modélisation numérique, dispersion, CORMIX, phosphogypse, Gabès.

### ABSTRACT

**Modelisation of the phosphogypsum spreading in the gulf of Gabes :** This work concerns the modeling of the phosphogypsum dispersion emitted by the chemical industries in the gulf of Gabès. The CORMIX model based on the dimensional analysis theory is used for this study. An analysis of the sensitivity of the model parameters was initially made; eight simulations were then carried out to determine the space extent of pollution on the level of the gulf. For each condition of tide, we carried out four simulations, two concerns the high tide and two concerns the low tide. Simulations showed that pollution by phosphogypsum is spread out in space over a surface of about 60 km<sup>2</sup>.

**Key words:** Numerical Modeling, dispersion, CORMIX, phosphogypsum, Gabès.

### INTRODUCTION

Le golfe de Gabès, situé au Sud-Est de la Tunisie, a subi de nombreuses atteintes à l'environnement avec les rejets des polluants en mer. En effet, l'industrialisation de la région de Gabès s'est traduite au cours des années 70, par l'implantation à Ghannouche d'un complexe d'industrie chimique autour du port de commerce situé à 3 km au nord de Gabès. Le résidu de fabrication d'acide phosphorique et du Triple Superphosphate, constitué essentiellement par le phosphogypse, est déversé dans le golfe de Gabès.

Le but de ce travail est de tester la possibilité de l'application du modèle CORMIX aux cas des rejets des effluents en mer et la détermination de l'étendue spatiale du phosphogypse dans le golfe de Gabès.

### MATERIEL ET METHODE

Le modèle que nous avons utilisé dans cette étude est un modèle numérique basé sur la théorie des échelles des longueurs. Le modèle CORMIX (*CORnell MIXing zone expert system*) est un modèle basé sur l'analyse dimensionnelle [Akar et al., 1991].

L'analyse du panache d'un rejet est basée sur la subdivision de l'étendue de l'écoulement en deux régions. Une région située proche du rejet et une deuxième relativement loin du rejet. Le modèle identifie d'abord le type du panache en fonction des variables de la décharge et les variables du milieu récepteur. Des simulations sont ensuite réalisées pour déterminer les caractéristiques du panache (concentration du polluant, étendue et épaisseur).

Les échelles de longueurs utilisées dans le modèle CORMIX ([1], [2], [3] et [4]) sont définies par le débit de la décharge ( $Q_0$ ), la quantité de mouvement ( $M_0$ ), la vitesse de la décharge ( $U_0$ ), les courants dans le milieu récepteur ( $U_d$ ) et la flottaison ( $J_0$ ). Elles

mesurent l'importance relative des paramètres du panache et du milieu récepteur [Akar et al., 1991].

1. la longueur de la décharge :

$$L_Q = \frac{Q_0}{M_0^{1/2}} \quad [1]$$

2. la longueur du rapport de la quantité de mouvement à la flottaison :

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{J_0^{1/2}} \quad [2]$$

3. la longueur du rapport de la quantité de mouvement aux courants ambiants :

$$L_m = \frac{M_0^{1/2}}{U_a} \quad [3]$$

4. la longueur du rapport du flux de la flottaison aux courants ambiants :

$$L_b = \frac{J_0}{U_a^3} \quad [4]$$

Les échelles de longueurs caractérisent une décharge dans un milieu récepteur à courants uniformes. Si les courants dans le milieu récepteur sont variables en fonction du temps, le milieu est alors instable. Cette instabilité est caractérisée par le paramètre  $dU_a(t)/dt$ . Deux échelles de longueurs ont été définies pour caractériser une décharge dans un tel milieu récepteur [Nash et al., 1996] :

$$L_u = \left( \frac{M_0}{\left| \frac{dU_a(t)}{dt} \right|} \right)^{1/3}$$

$$T_u = \left( \frac{M_0}{\left| \frac{dU_a(t)}{dt} \right|^4} \right)^{1/6}$$

et

L'échelle de la longueur du renversement ( $L_u$ ) représente la distance à laquelle l'effet du renversement est appréciable alors que l'échelle du temps ( $T_u$ ) mesure la durée du renversement [Nash et al., 1996].

## APPLICATION DU MODELE AU CAS DU REJET DE PHOSPHOGYPSE

### A. LES DONNEES DU MODELE

#### 1. La concentration du phosphogypse

La production du phosphogypse sec correspond environ à 5 tonnes par tonne de  $P_2O_5$  [Bourane, 1983]. La production journalière de  $P_2O_5$  par les industries chimiques, implantées à Gabès, est estimée à 2250 T/j c'est à dire une production journalière de l'ordre de 11250 tonnes du phosphogypse.

Le phosphogypse solide est dilué avec l'eau de mer jusqu'à l'obtention d'une solution de densité 1,2. L'eau gypseuse est ensuite acheminée par deux conduites circulaires et une conduite trapézoïdale vers le sud du port de commerce de Ghannouche (fig. 1)

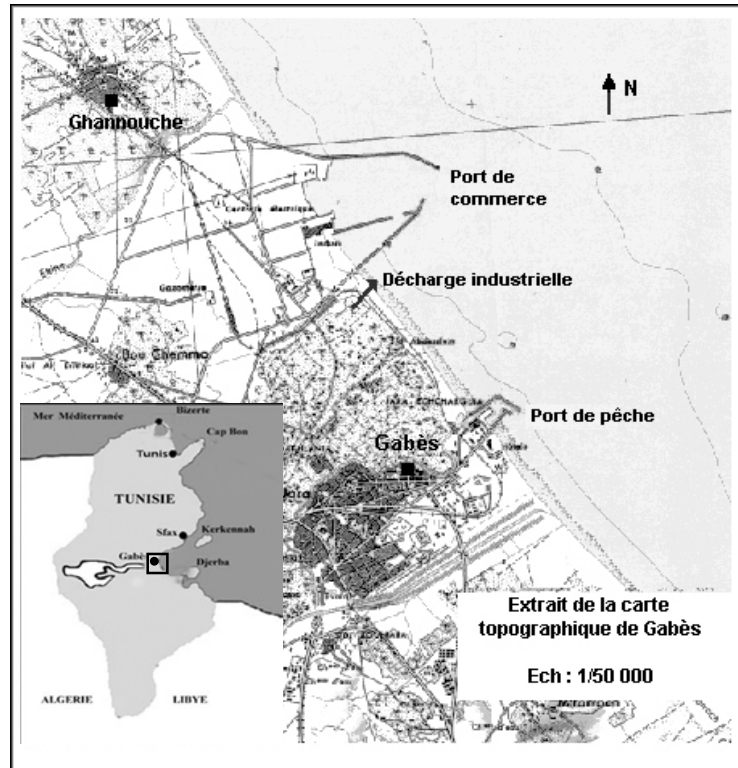


Figure 1 : Situation géographique de la décharge d'eau gypseuse dans le golfe de Gabès

où elle se mélange avec l'eau de refroidissement rejetée par l'ensemble des unités d'industries chimiques [GCT, 1992]. La quantité totale d'eau qui atteint la mer est donc de 47000 m<sup>3</sup> par heure (13 m<sup>3</sup>/s).

La solubilité du phosphogypse augmente avec la température et la durée d'agitation dans le milieu solvant. Elle est de l'ordre de 5 g/l après 6 heures d'agitation et de 9,11 g/l après 48 heures d'agitation [Elkihel, 1995]. Nous considérons que la concentration du phosphogypse dissous à la décharge (C<sub>0</sub>) est égale à 10 g/l.

### 2. Dimensions du canal de la décharge

Les rejets de phosphogypse se déversent sur la plage au sud du port de commerce et s'écoulent lentement vers la mer. Un canal est alors creusé le long de la plage par l'érosion. Les dimensions du canal dépendent de la marée :

- A marée basse, la largeur et la profondeur du canal sont 50 m et 0,3 m, respectivement,
- A marée haute, la largeur et la profondeur du canal sont 70 m et 2,3 m, respectivement.

### 3. Les profondeurs du réceptacle

L'application du modèle CORMIX nécessite la connaissance de la profondeur de l'eau au niveau de la décharge et de la profondeur du réceptacle. Le choix de ces deux paramètres dépend du débit de décharge, de l'intensité et du sens des courants et de la marée.

### 4. La rugosité du fond

Nous avons utilisé le coefficient de Darcy-Weisbach *f* (cas de réceptacles de grandes dimensions) pour déterminer la rugosité du fond. La couche superficielle du sédiment du fond étant vaseuse, nous avons adopté une valeur de *f* égale à 0,02 [Jones et al., 1996].

### 5. La marée dans le golfe de Gabès

D'après les observations faites par le LCHF en 1958-1959, le niveau maximum en se plaçant dans les plus mauvaises conditions (marée équinoxiale forte et

coup de vent au large) est compris entre 2,3 et 2,4 m à laquelle il faudrait ajouter une cinquantaine de centimètres (phénomènes atmosphériques) pour obtenir la cote maximale au moment de la pleine mer des vives eaux (2,6 m) [HP, 1995].

### 6. Les courants

Les mesures faites par le LCHF en 1978 le long des côtes tunisiennes ont montré que les vitesses des courants générés par le vent près de la côte sont les plus intenses. Elles sont généralement comprises entre 0,15 m/s et 0,30 m/s. Les courants de marée mesurés lors du flot varient entre 0,1 et 0,15 m/s, alors qu'ils sont de l'ordre de 0,05m/s pendant le jusant [Guillaumont et al., 1995].

## B. SIMULATION DE L'ETENDUE DU PHOSPHOGYPSE

Pour chaque condition de marée (vives eaux et mortes eaux), nous avons réalisé des simulations avec des configurations possibles de situations de courants (faibles et forts) et de marée (basse et haute).

La première série de simulations consiste à étudier la dispersion du phosphogypse pendant le jusant et le flot des vives eaux. La deuxième série de simulations consiste à étudier la dispersion du phosphogypse pendant le jusant et le flot des mortes eaux. Dans le tableau I suivant nous présentons les différentes conditions de marée ainsi que les données du modèle CORMIX.

Chaque série de simulations a fait l'objet de quatre scénarios, deux scénarios relatifs aux courants de jusant et deux autres scénarios relatifs aux courants de flot. Pour chaque condition de marée (flot, jusant), nous avons varié l'intensité des courants, les profondeurs de la décharge, du milieu récepteur et les dimensions du canal de la décharge. Le débit de la décharge, la concentration du phosphogypse à la décharge et la vitesse du vent sont supposés constants.

D'après les résultats des simulations, les caractéristiques du panache (concentration du

Tableau I: Les différentes conditions de la marée des vives eaux et les données du modèle

Conditions de la Marée	Les données du modèle				
	U <sub>a</sub>	H <sub>D</sub>	H <sub>a</sub>	Lc	hc
Jusant et Courant faible	0,05	2	10	50	0,3
Jusant et Courant fort	0,2	2	2	50	0,3
Flot et Courant faible	0,05	4	11,5	70	2,3
Flot et Courant fort	0,2	4	9	70	2,3

U<sub>a</sub> : l'intensité des courants dans le milieu récepteur (m/s), H<sub>D</sub> : la profondeur de l'eau à l'embouchure du canal de la décharge (m), H<sub>a</sub> : la profondeur de l'eau dans le milieu récepteur (m), Lc : la largeur du canal de la décharge (m), hc : le tirant d'eau dans le canal de la décharge (m).

phosphogypse, étendue spatiale et épaisseur) résultant des courants de jusant et de flot lors des mortes eaux sont similaires à celles obtenues lors des courants de vives eaux [Béjaoui, 2001]. Nous présentons alors les résultats de la première série de simulations.

**Simulation 1 :**

Cette simulation consiste à déterminer l'étendue du panache et l'évolution de la concentration du phosphogypse dans l'eau lors des courants faibles de jusant. Les données du modèle sont :

1. la vitesse du courant dans le milieu récepteur est égale à 0,05 m/s,
2. la profondeur de l'eau à l'embouchure du canal de la décharge est de l'ordre de 2 m,
3. la profondeur de l'eau dans le milieu récepteur est de l'ordre de 10 m.

Dans ce cas, l'écoulement prend la forme d'un jet au niveau de la région proche (fig. 2a), puis il s'étale vers le large sous l'effet de la diffusion horizontale. Une zone de recirculation apparaît entre la source de rejet et le point de contact avec le rivage.

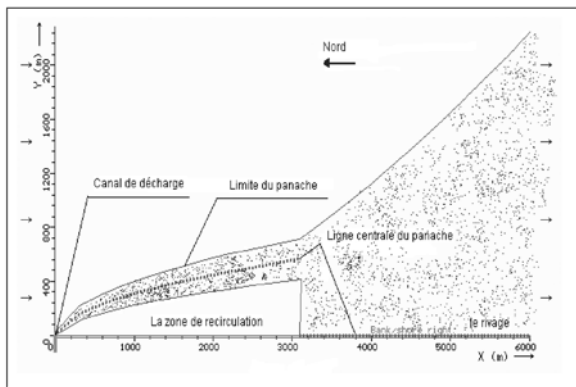


Figure 2a : Panache résultant des courants faibles de jusant

A partir du point de rejet jusqu'à 3 km de la source l'écoulement a la forme d'un jet libre dirigé vers le sud. Le panache touche le fond à 600 m environ du point de rejet. Cette distance relativement faible est due à la faible profondeur de l'eau au niveau de l'embouchure du canal de la décharge et à l'absence des forces de flottaisons. La superficie couverte par le panache est de l'ordre de 6 km<sup>2</sup>.

La concentration du phosphogypse décroît rapidement au niveau de l'embouchure du canal pour atteindre des valeurs de l'ordre de 15 % de la concentration initiale. Elle diminue encore quand on s'éloigne de la source de rejet. Elle est de l'ordre de 1% de la concentration initiale à 6 km (fig. 2b).

**Simulation 2 :**

Cette simulation consiste à déterminer l'étendue du panache et l'évolution de la concentration du

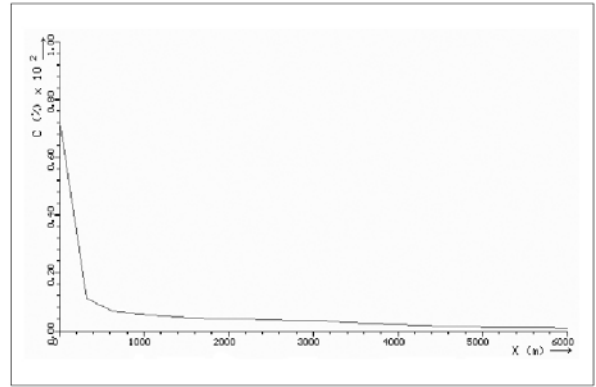


Figure 2b : Profil de concentration résultant des courants faibles de jusant

phosphogypse dans l'eau lors des courants forts de jusant. Les données du modèle sont :

1. la vitesse du courant dans le milieu récepteur est égale à 0,2 m/s,
2. la profondeur de l'eau à l'embouchure du canal de la décharge est de l'ordre de 2 m,
3. la profondeur de l'eau dans le milieu récepteur est de l'ordre de 2 m.

D'après les résultats des simulations, le panache s'étale sur une superficie de 2,5 km<sup>2</sup> (fig. 3a).

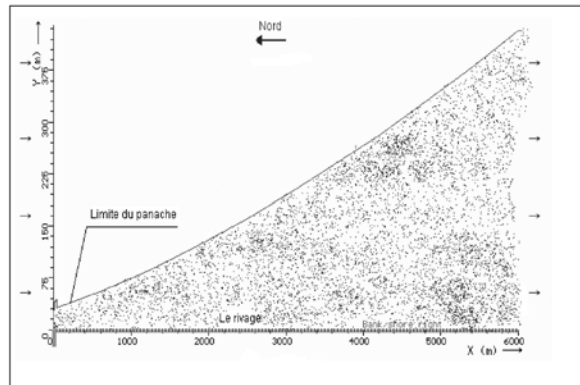


Figure 3a : Panache résultant des courants forts de jusant

L'intensité forte des courants a fait que le panache est fortement dévié vers la rive droite (à droite de la source de rejet) et reste collé au rivage. La zone de l'établissement de l'écoulement (zone de transition) ainsi que la région faiblement déviée sont absentes.

La concentration du phosphogypse est de l'ordre de 18 % de sa valeur initiale. En s'éloignant vers le large, elle diminue encore pour atteindre 1 % de la concentration initiale à 6 km de la source de rejet (fig. 3b).

**Simulation 3 :**

Cette simulation consiste à déterminer l'étendue du panache et l'évolution de la concentration du phosphogypse dans l'eau lors des courants faibles du flot. Les données du modèle sont :

1. la vitesse du courant dans le milieu récepteur est égale à 0,05 m/s,
2. la profondeur de l'eau à la décharge est de l'ordre de 4 m,
3. la profondeur du milieu récepteur est de l'ordre de 11,5 m.

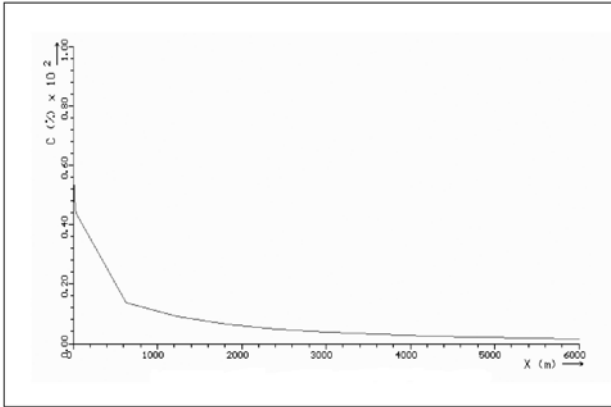


Figure 3b : Profil de concentration résultant des courants forts de jusant

D'après les résultats des simulations, le panache s'étale sur une superficie de 9 km<sup>2</sup>. Dans ce cas (courant de flot) la section du canal de la décharge augmente et par conséquent la quantité de mouvement du panache diminue (c'est à dire la force de pénétration du jet dans le milieu récepteur diminue). Ces conditions font que le panache touche la rive gauche (à gauche de la source de rejet) au niveau de l'embouchure du canal de la décharge (figure 4a).

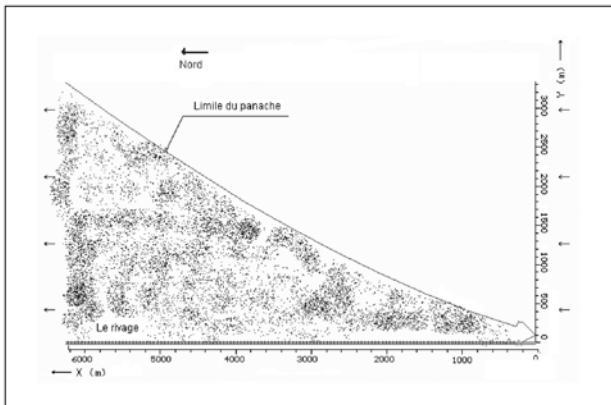


Figure 4a : Panache résultant des courants faibles de flot

La concentration du phosphogypse décroît rapidement au niveau de la zone de l'établissement de l'écoulement (embouchure du canal) pour atteindre des valeurs de l'ordre de 30 % de la concentration initiale. Elle est de l'ordre de 1% de sa valeur initiale à 6 km de la source de rejet (fig. 4b).

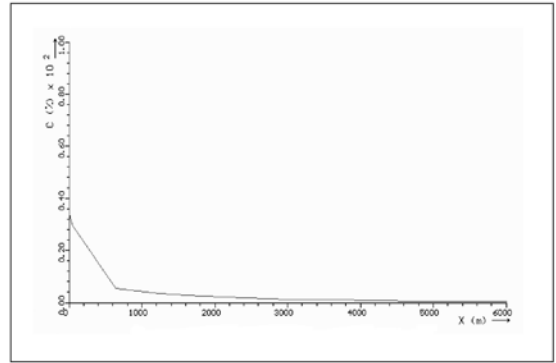


Figure 4b : Profil de concentration résultant des courants faibles de flot

**Simulation 4 :**

Cette simulation consiste à déterminer l'étendue du panache et l'évolution de la concentration du phosphogypse dans l'eau lors des courants forts de flot. Les données du modèle sont :

1. la vitesse des courants dans le milieu est de l'ordre de 0,2 m/s,
2. la profondeur de l'eau à la décharge est de 4 m,
3. la profondeur de l'eau du milieu récepteur est de 9 m.

Les résultats de la présente simulation montrent que le panache s'étend sur une superficie de 3,5 km<sup>2</sup> (fig. 5a). L'intensité forte des courants provoque une déviation rapide du panache vers le nord.

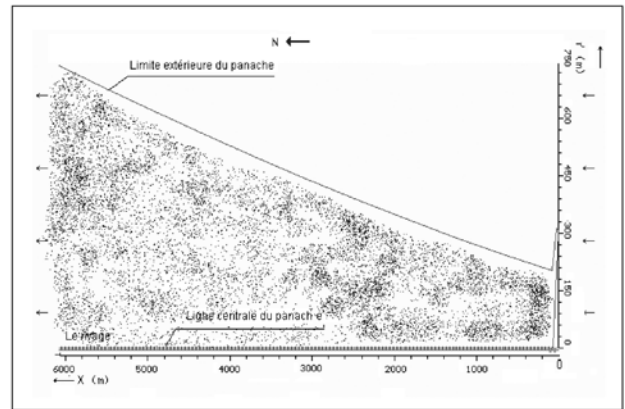


Figure 5a : Panache résultant des courants forts de flot

La concentration du phosphogypse diminue en fonction de la distance par rapport à la source de rejet. Elle est de l'ordre de 30 % de la concentration initiale au niveau de l'embouchure du canal de la décharge et de 0,5 % à environ 5 km de la source de rejet (fig. 5b).

**C. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Les simulations que nous avons réalisées avec le modèle CORMIX montrent que les caractéristiques du panache sont essentiellement fonction de l'intensité des courants et de la profondeur de l'eau du milieu récepteur.

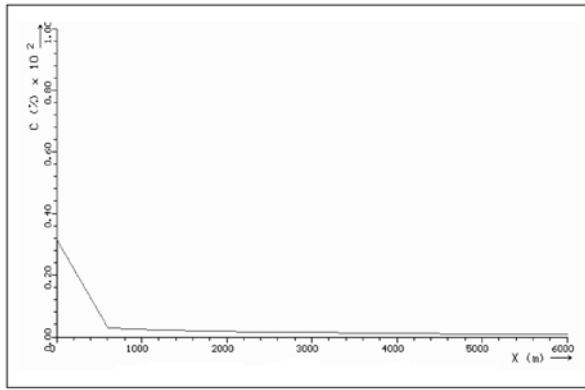


Figure 5b : Profil de concentration résultant des courants forts de flot

La pollution s'étale d'avantage lorsque la profondeur de l'eau est importante et les courants dans le milieu récepteur sont faibles. Dans un milieu récepteur à profondeur faible le phosphogypse chute rapidement sur le fond et sera piégé sur le fond par les forces de frottement. Par contre si la profondeur de l'eau est importante, le temps de chute est alors plus important. Pour des courants unidirectionnels intenses, ce qui est le cas proche de la côte, le phosphogypse se disperse selon la direction principale de l'écoulement, alors que si les courants sont faibles, il se disperse selon au moins deux directions. Ainsi, la superficie de la zone polluée est importante lorsqu'il s'agit des courants faibles de flot.

La superficie occupée par le panache varie selon les conditions du milieu récepteur et les conditions de la décharge entre 1 et 9 km<sup>2</sup>. Pour les forts courants de jusant, la superficie du panache est réduite (environ 1 km<sup>2</sup>), alors qu'elle est importante pour des faibles courants de flot (environ 9 km<sup>2</sup>). Le cas le plus défavorable (vaste étendu du panache) est alors relatif aux faibles courants de flot et de jusant, c'est à dire lorsque la profondeur du milieu récepteur est importante et les courants ambiants sont faibles.

Pour couvrir la totalité de la zone de la dispersion du phosphogypse, nous avons utilisé les travaux de Nash et al. (1996) relatifs à la dispersion d'un polluant inerte dans un milieu instable (fig. 6). L'étendue du panache, dans les conditions instables, peut être assimilée à une superficie de forme circulaire et de rayon égal à la longueur du panache dans les conditions stables. Ainsi, lorsque les courants dans le golfe s'inversent, la direction du panache s'inverse aussi décrivant pendant un cycle complet un disque de rayon 6 km. La superficie occupée par le phosphogypse est alors égale à 60 km<sup>2</sup> répartie de part et d'autre de la source de la décharge (fig. 6).

Pour la plupart des simulations réalisées, le panache touche le fond près de la décharge à une distance de l'ordre de 600 m de la source de rejet. Ceci est essentiellement dû à la densité importante des eaux gypseuses. En effet, la distance d'interaction avec le fond varie en fonction de l'intensité des courants ambiants, de la profondeur du milieu récepteur, de la vitesse de la décharge et de la densité relative des eaux gypseuse.

L'interaction des panaches avec le rivage est aussi fonction des conditions ambiantes. Pour le cas des faibles courants de jusant (mortes et vives eaux), les panaches touchent le rivage à une distance relativement importante (3 km) en comparaison aux autres cas où l'interaction s'effectue au niveau de la zone de la décharge.

D'après les simulations, la dilution du phosphogypse augmente rapidement au niveau de la décharge sous l'effet de la turbulence à l'embouchure du canal. En s'éloignant au large, à une distance de 6 km de la source de rejet, la dilution décroît lentement pour atteindre des valeurs de l'ordre de  $C_0/1000$ . Etant donné que la concentration du phosphogypse à la décharge est égale à  $C_0$  (10 g/l), sa concentration à 6 km de la source de rejet sera égale à 10 mg/l. Le phosphogypse est encore présent au-delà de 6 km de la source de rejet.

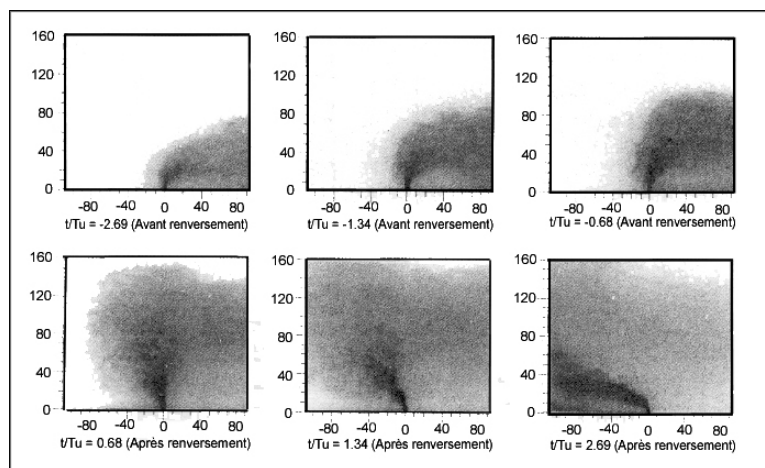


Figure 6 : Evolution d'un effluent dans un milieu récepteur instable

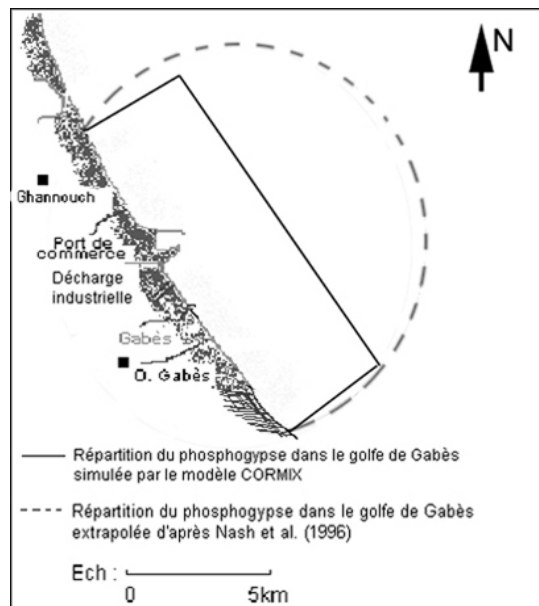


Figure 7 : Répartition du phosphogypse simulé et extrapolé

## CONCLUSIONS

Le but de ce travail est de déterminer avec le modèle CORMIX l'étendue du phosphogypse rejeté par le Complexe du Groupe Chimique Tunisien dans le golfe de Gabès.

Le modèle a été appliqué selon différentes directions. Le choix d'une direction donnée est fonction principalement de l'intensité des courants et de la bathymétrie du milieu récepteur. Les résultats obtenus montrent que la pollution due au phosphogypse est étalée sur une superficie de l'ordre de 60 km<sup>2</sup>.

L'application du modèle CORMIX, nous permis d'obtenir une idée qualitative mais fiable de la superficie occupée par le phosphogypse. Le modèle a permis de montrer que la situation menant à une forte dispersion de la pollution dans le golfe de Gabès est celle correspondant à des courants faibles pendant les hautes mers.

## Remerciements

Nous remercions la Direction de l'Environnement Industrielle (Ministère de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire) de nous avoir fourni les données nécessaires pour réaliser ce travail. Nous remercions également Messieurs Ali Harzallah maître de conférence et Mouldi Brahim maître

assistant à l'INSTM pour la contribution scientifique à ce travail.

## BIBLIOGRAPHIE

- Akar P. J. and Jirka G. H., 1991: CORMIX2, An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic multiport diffuser discharges. *Cornell Univ., Thaca, NY. DeFrees Hydraulics Lab., EPA/600/3-91/073, 223 p.*
- Béjaoui B., 2001: Modélisation de la dispersion des polluants en mer – cas des rejets de phosphogypse dans le Golfe de Gabès. *DEA/ENIT-Département d'hydraulique, 101 p.*
- Bourane Z. K., 1983 : Le marché mondial des phosphates et des engrais phosphatés-caractéristiques et perspectives. *La bibliothèque des Matières Premières - collection dirigée par Philippe Chamelin, Paris, 239 p.*
- Elkhiel B., 1995 : Impact des rejets du phosphogypse dans le golfe de Gabès : Géochimie des métaux lourds dans les sédiments. *DEA/FST - Département de Géologie, 86 p.*
- Groupe Chimique Tunisien (GCT), 1992 : Etude d'impact sur l'environnement des rejets de Phosphogypse. *Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire.*
- Guillaumont B., Ben Mustapha S., Ben Moussa H., Zaouali J., Soussi N., Ben Mammou A. et Cariou C., 1995 : Pollution Impact Study In Gabès Gulf (Tunisia) Using Remote Sensing Data. *Marine Technology Society Vol. 29, N°2, pp. 46-58.*
- Hidrotécnica Portuguesa (HP), 1995 : Actualisation des données météorologiques et de simulation de la Houle. Étude générale pour la protection du littoral tunisien. Rapports pour le compte du Ministère de l'Équipement et de l'Habitat/Direction Générale des Services Aériens et Maritimes (DGSAM).
- Jones G. R., Nash J. D. and Jirka G. H., 1996 : CORMIX3 An Expert System for Mixing Zone Analysis and Prediction of Buoyant Surface Discharges. *Tech. Rep., Cornell Univ., Thaca, NY. DeFrees Hydraulics Lab., (Also to published by USEPA, Environmental Research Lab. Athens, GA).*
- Nash J. D. and Jirka G. H., 1996 : Buoyant surface discharges into unsteady ambient flows *Dynamics of atmospheres and oceans. 24, pp. 75-84.*