

Société de Calcul Mathématique, S. A.
Outils d'aide à la décision
depuis 1995



Estimation de la pollution dans un port

- Assistance Méthodologique -

Rapport présenté à

Total Raffinage Marketing

par la

Société de Calcul Mathématique SA

Décembre 2010

Résumé opérationnel

Nous répondons ici à la commande 4503940535 de Total Raffinage Marketing, du 16/11/2010 : comment évaluer la quantité de fioul due à l'Erika, présente dans le port de Pornichet ?

Nous commençons par une critique méthodologique des deux documents qui nous ont été remis : le document "Géovariances" et le calcul fait par Total. La critique est la même dans les deux cas : à partir d'un très petit nombre de mesures, on réalise des extrapolations ; selon la manière dont ces extrapolations sont faites, selon la manière dont les mailles sont construites, ces extrapolations peuvent être différentes. Il n'existe aucune manière scientifique de les départager, et des experts judiciaires peuvent en débattre pendant des décennies. D'un point de vue scientifique, notre analyse est qu'aucun de ces documents n'est correct.

Nous mettons ensuite en œuvre un procédé mathématique de reconstruction, l'Hypersurface Probabiliste (EPH), dont les grandes lignes sont décrites en annexe. Pour une description précise, nous renvoyons au livre de Bernard Beauzamy "Nouvelles Méthodes Probabilistes pour l'Evaluation des Risques", éditions de la SCM, 2010.

L'EPH permet de "propager" l'information, de manière probabiliste, en tout point du domaine (ici le port), à partir des points où elle a été recueillie (ici, les points de mesure). Elle possède deux particularités : tout d'abord, elle ne fait aucune hypothèse a priori (on ne suppose pas de mode d'extrapolation), et ensuite le résultat est probabiliste : on ne donne pas une valeur précise, mais une loi de probabilité. L'EPH représente donc une méthode complètement honnête et indiscutable de propagation de l'information, même si celle-ci est pauvre.

Nous décomposons le port en trois couches : 0 – 20 cm de profondeur, 20 à 30 cm, au-delà de 30 cm, parce que la surface des trois couches n'est pas la même, parce que les mesures faites ne sont pas les mêmes, et parce que le comportement vis-à-vis de la pollution n'est pas le même (sédimentation). Cette précaution méthodologique, qui nous paraît essentielle, n'est pas correctement prise dans les deux documents que nous avons analysés.

Pour la première couche (0-20 cm), l'EPH conduit à une estimation moyenne (espérance de la loi) qui est de 3,4 tonnes de fioul "Erika", et pour la seconde couche, de 19,4 tonnes.

Ces valeurs pour la seconde couche sont élevées : ceci traduit simplement le fait que les mesures sont en nombre très faible. En un point situé à grande distance des points de mesure, par exemple sur le bord nord ou nord ouest du port, on ne sait à peu près rien, puisque tous les points de mesure sont au sud.

Dans ces conditions, la stricte application des principes probabilistes conduit, pour une maille de la zone nord, à une estimation relativement élevée (de l'ordre de 1 700 mg/kg), et comme cette zone est très vaste, la quantité totale est importante. Le moyen de réduire cette estimation serait de faire davantage de mesures sur cette couche : nous indiquons à quel endroit elles doivent être faites.

Disons-le de manière très claire : sur une très vaste étendue, si l'on ne dispose que de très peu de mesures, même si une petite proportion seulement a révélé des résultats élevés, l'intégrale globale sera significative.

Pour la troisième couche (au-delà de 30 cm), comme aucune mesure n'a été faite, aucune extrapolation ne peut être réalisée, qu'elle soit probabiliste ou déterministe. Si le port estime qu'une pollution y est présente, c'est à lui d'apporter, par des mesures appropriées, la preuve du préjudice, et ce n'est pas à Total de le faire.

Pour mettre en place de futurs plans d'expérience, nous définissons quatre zones de risque de présence de fioul Erika sur la carte de la seconde couche (20-30 cm). A partir de ces zones, nous simulons un plan d'expérience constitués de vingt mesures supplémentaires dans cette couche. Si l'absence de fioul Erika est avérée pour toutes les mesures, l'estimation dans cette couche ne serait plus que de 3,6 t. Au total, la quantité de fioul Erika présent dans le port d'échouage de Pornichet serait de 7 t. Avec davantage de mesures négatives, la quantité totale serait encore réduite, bien évidemment.

Sommaire

Résumé opérationnel	2
Introduction	5
1 Analyse critique de l'estimation effectuée par Total.....	5
1.1 Analyse des campagnes Le Floch et Cèdre	5
1.1.1 Estimation de la quantité de vase	5
1.1.2 Estimation de la quantité résiduelle de fioul provenant de l'Erika	5
1.1.2.1 Discrétisation par mailles de 25 m de côté	5
1.1.2.2 Extrapolation à l'ensemble du port	6
1.2 Analyse par type de consistance du fioul de l'Erika	6
2 Analyse critique de l'estimation effectuée par Geovariances	7
3 Estimation de la SCM.....	8
3.1 Estimation de la couche de 0 à 20 cm.....	9
3.2 Estimation de la couche de 20 à 30 cm.....	11
3.3 Plan d'expérience pour la couche de 20 à 30 cm	13
3.3.1 Détermination de zones de risque	13
3.3.2 Simulation d'un plan d'expérience	15

Introduction

A la suite du naufrage du pétrolier Erika en 1999, une certaine quantité de fioul s'est répandue en mer et sur les côtes. Le port de Pornichet est largement envasé, et au sein de cette vase, on retrouve une certaine quantité de fioul, dont une partie est attribuable à l'Erika. Différentes campagnes de mesures ont été réalisées, à trois reprises, et elles ont apporté des informations (assez pauvres et assez imprécises) sur la quantité de fioul présente aux points de mesure. La question posée est : à partir de ces informations, reconstituer la quantité totale de fioul, attribuable à l'Erika, présente dans le port de Pornichet.

1 Analyse critique de l'estimation effectuée par Total

1.1 Analyse des campagnes Le Floch et Cèdre

L'estimation réalisée en avril 2010 par Total est basée, dans une première approche, sur l'exploitation des mesures réalisées lors des campagnes Le Floch et Cèdre. Au total, ces deux campagnes permettent de disposer de 59 mesures dont 33 ont donné lieu à des analyses de densité en HydroCarbures Totaux (HCT) dont les unités sont les suivantes : *mg* d'HCT / *kg* de vase.

1.1.1 Estimation de la quantité de vase

Total a choisi de représenter la zone portuaire étudiée en la décomposant en mailles de 25 m de côté. Les zones draguables (hors platier rocheux et enrochements) s'étendent sur 144 mailles soit une surface de 9 ha. L'exploitation des données lithologiques (vase, cailloux...) de la campagne Le Floch permet d'estimer convenablement la quantité de vase présente dans le port : Total estime que le port contient environ 72 000 m³ de vase, soit environ 115 000 t. Cette valeur est cohérente avec celle avancée par le port (80 000 m³), ainsi qu'avec l'estimation effectuée par la SCM (voir chapitre 3).

1.1.2 Estimation de la quantité résiduelle de fioul provenant de l'Erika

1.1.2.1 Discrétisation par mailles de 25 m de côté

En revanche, la discrétisation par maille de 25 m de côté n'est pas correcte pour estimer la quantité résiduelle du fioul provenant de l'Erika. En effet, si on ne répertorie qu'une seule mesure dans une maille, l'extrapolation à la maille entière (soit 625 m²) conduit à une majoration excessive.

Par exemple, pour la maille J8, on dispose de deux mesures avec de très fortes densités en HCT : 3 160 et 9 290 *mg* d'HCT / *kg* de vase. Si on suppose que la densité de l'ensemble de la maille correspond à la densité moyenne, en multipliant par la masse de vase de la maille, on obtient 1 885 *kg* de fioul issu de l'Erika.

1.1.2.2 Extrapolation à l'ensemble du port

En généralisant cette approche à l'ensemble des mailles, on trouve huit mailles cumulant 643 kg de fioul, ainsi que la maille J8, soit un total de 2 528 kg.

Les campagnes Le Floch et Cèdre ont permis de sonder environ 30% de la surface du port envasée. Total multiplie la quantité estimée par 3,33 pour extrapoler à l'ensemble du port. La quantité de fioul provenant de l'Erika est alors estimée à 8 400 kg.

Cette méthode n'est pas satisfaisante, car rien ne permet d'affirmer que la zone non mesurée contient du fioul issu de l'Erika. La dispersion du fioul dans le port n'étant pas homogène, il est impossible de généraliser l'estimation de cette manière.

De plus, la quantité de fioul estimée dans la maille J8 n'est pas prise en compte à cause de l'effet « pépite » qui n'est pas expliqué dans le document. La quantité de fioul provenant de l'Erika est alors rabaisée à 2 100 kg. Ce passage de 8 400 kg à 2 100 kg nécessiterait de plus amples explications.

1.2 Analyse par type de consistance du fioul de l'Erika

La seconde approche envisagée par Total consiste à répertorier le fioul en supposant différentes consistances allant de boulette de 6 mm³ à des plaques de 25 m². Les différentes estimations pour l'ensemble du port donnent des résultats allant de 76 kg à 12 000 kg de fioul.

Cette approche n'est pas satisfaisante, car elle ne fait pas le lien avec ce qui a été trouvé dans le port ; elle raisonne uniquement sur la base des rejets "Erika" recensés ailleurs.

2 Analyse critique de l'estimation effectuée par Geovariances

L'estimation réalisée en septembre 2010 par Geovariances est basée sur l'exploitation des mesures réalisées lors des campagnes Le Floch, marine et Cèdre.

Geovariances considère que les données issues des trois campagnes ne permettent d'estimer la quantité de fioul que dans la couche allant de 0 à 25 cm de vase.

Parmi les 51 valeurs utilisées par Geovariances, seule la valeur à 7 610 *mg* d'HCT / *kg* de vase est attribuée à l'Erika. Geovariances fait la moyenne des mesures et extrapole à l'ensemble du port :

- épaisseur de vase : 25 cm ;
- superficie : 7,5 ha (exclusion de l'entrée du port qui n'est pas envasée) ;
- densité de la vase : 1,6 ;
- densité moyenne en HCT dans l'ensemble du port : 222 *mg* d'HCT / *kg* de vase.

La quantité totale de fioul est donc estimée à 6,6 t. En refaisant le même calcul sans la valeur à 7 610 *mg* d'HCT / *kg* de vase, la quantité de fioul ne provenant pas de l'Erika est estimée à 2,2 t. Au final, Geovariances estime que la quantité résiduelle de fioul provenant de l'Erika est de 4,4 t.

En effectuant la moyenne de toutes les mesures disponibles, cela correspond à affecter chaque mesure à 1/51^{ème} de la surface du port. Sachant que la surface envasée du port a une superficie de 75 000 m², la valeur à 7 610 *mg* d'HCT / *kg* de vase est donc affectée à une zone d'environ 1 500 m². Comme pour l'estimation effectuée par Total, l'extrapolation de cette seule mesure est excessive car elle est affectée, par exemple, à une plaque de 30 m sur 50 m et de 25 cm d'épaisseur.

3 Estimation de la SCM

Pour prendre en compte toutes les particularités liées aux données récoltées lors des trois campagnes de mesures, nous procédons de la manière suivante :

- Au lieu d'affecter les mesures à des mailles de 25 m de côté ou de moyenniser l'ensemble des mesures pour la totalité du port, nous utilisons la méthode de l'hypersurface probabiliste (EPH) qui permet de tenir compte de la proximité des zones avec et sans fioul.
- La zone étudiée est discrétisée en maille d'1 m de côté, ce qui permettra de tenir compte de la distance entre les points de mesures.
- La quantité de fioul est reconstituée par couche de vase. Avec les données dont nous disposons, nous allons étudier les couches de 0 à 20 et de 20 à 30 cm. Au-delà de 30 cm aucune donnée n'a été collectée.

Dans la mesure où aucune donnée n'existe au-delà de 30 cm, ce n'est pas à Total d'apporter la preuve qu'il n'y a pas de pollution, mais c'est aux responsables du port d'apporter la preuve qu'il y en a : ceci est une constante en droit français et international. Celui qui s'estime lésé doit mettre en évidence des éléments factuels justifiant le préjudice qu'il estime avoir reçu. En tout état de cause, il est évident que :

- Aucune extrapolation d'une couche à une autre ne saurait être justifiée, car chaque couche correspond à une sédimentation différente, à une époque différente ;
- Aucune méthode mathématique ne permet de reconstituer des données quand on n'en a pas du tout.

3.1 Estimation de la couche de 0 à 20 cm

La surface de la couche de 0 à 20 cm de vase est de 76 875 m²; elle est représentée en clair sur la figure 1 :

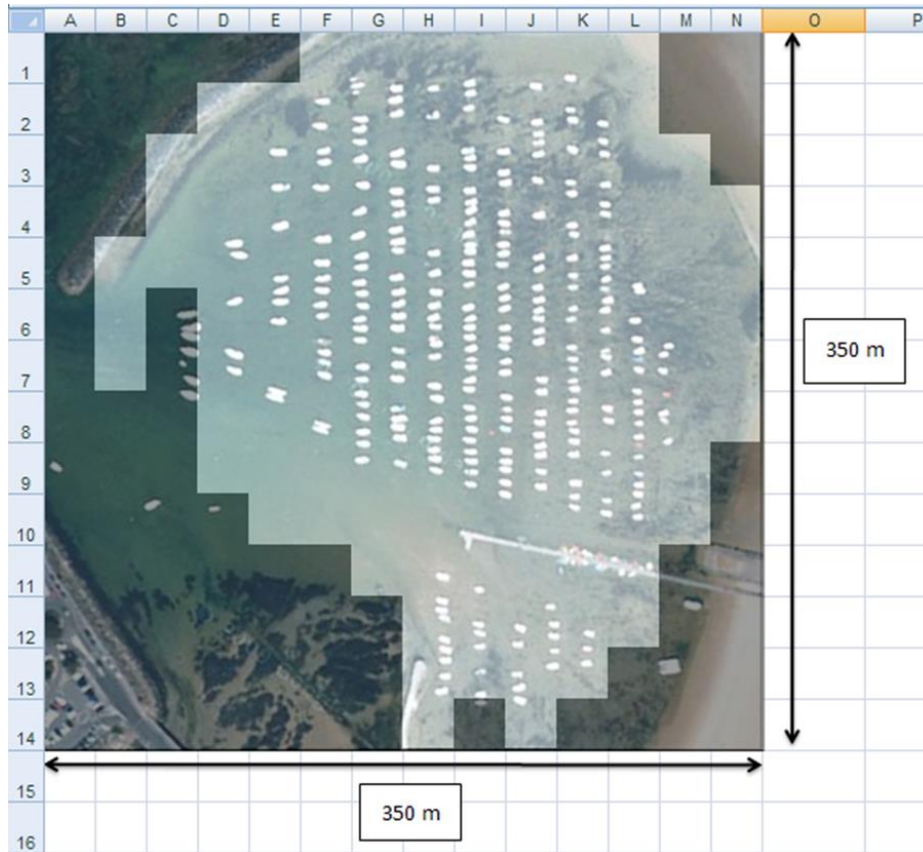


Figure 1 : Surface de la couche de 0 à 20 cm de vase

La profondeur des mesures de la campagne Le Floch n'étant pas connue, nous utilisons les 51 mesures comprises entre 0 et 20 cm issue des campagnes marine et Cèdre. Parmi ces mesures, une seule est attribuée à l'Erika avec comme valeur 7 610 mg d'HCT / kg de vase. Les autres mesures ne correspondant pas à du pétrole de l'Erika, la densité en pétrole est nulle.

L'hypersurface probabiliste permet alors de « reconstruire » la densité en pétrole Erika des 76 824 cellules vides à partir des 51 données disponibles. On obtient la carte du port (figure 2) en fonction de la densité de fioul Erika dans la couche entre 0 et 20 cm. La valeur maximale est indiquée en rouge, les zones où la présence de fioul Erika est nulle sont en bleu.

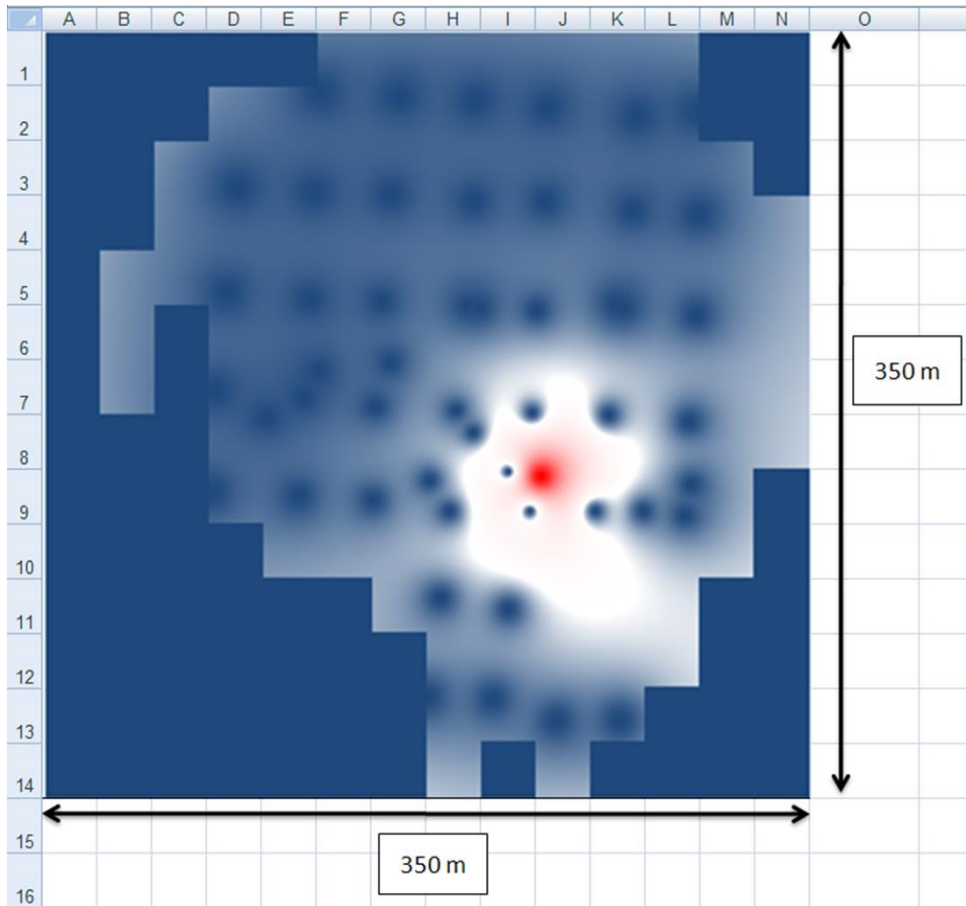


Figure 2 : Carte de la densité de fioul Erika dans la couche de 0 à 20 cm

Connaissant la masse de vase dans chaque cellule, l'estimation de la quantité de fioul Erika présent dans la couche entre 0 et 20 cm de vase dans le port d'échouage de Pornichet est de 3,4 t.

Dans cette première couche, la quantité de mesures est suffisante pour restreindre la zone de forte densité. La zone où la densité en pétrole Erika est supérieure à 1 000 mg d'HCT / kg de vase ne représente que 2,6% de la surface de la couche, soit environ 2 000 m².

3.2 Estimation de la couche de 20 à 30 cm

La surface de la couche de 20 à 30 cm de vase est de 63 750 m²; elle est représentée en clair sur la figure 3 :

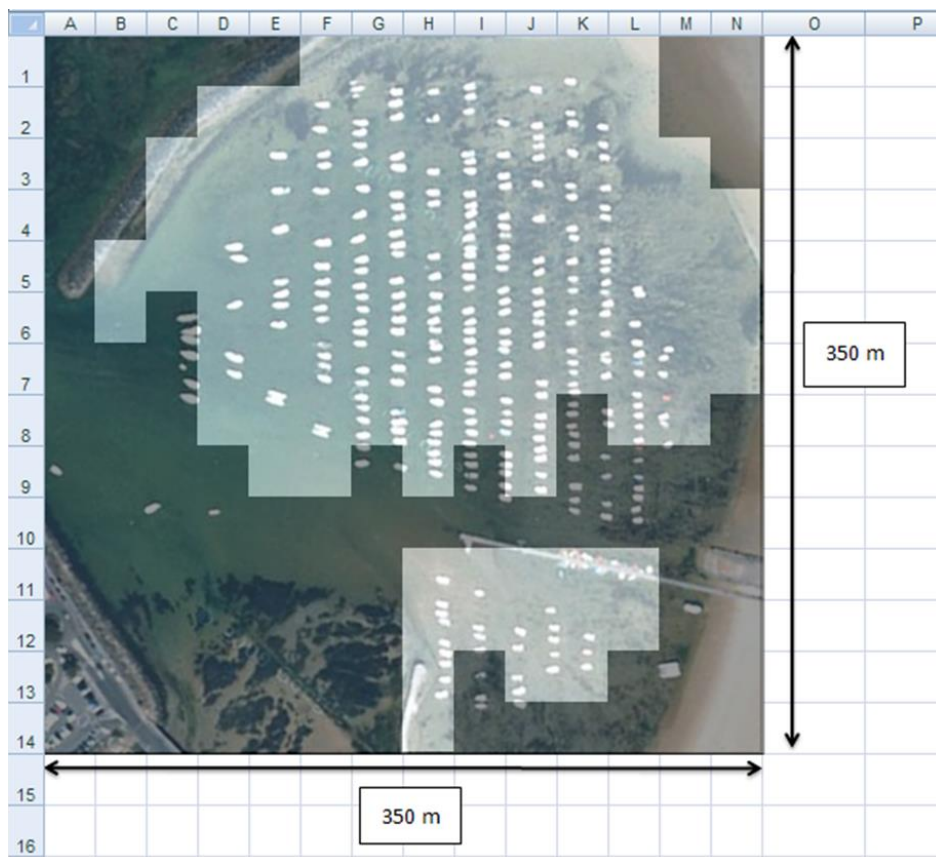


Figure 3 : Surface de la couche de 20 à 30 cm de vase

Parmi les six mesures disponibles, deux sont attribuées à l'Erika avec comme valeur 3 160 et 9 290 mg d'HCT / kg de vase. Les autres mesures ne correspondant pas à du pétrole de l'Erika, la densité en pétrole est nulle.

L'hypersurface probabiliste permet alors de reconstruire la densité en pétrole Erika des 63 744 cellules vides à partir des six données disponibles. On obtient la carte du port (figure 4) en fonction de la densité de fioul Erika dans la couche entre 20 et 30 cm. La valeur maximale est indiquée en rouge, les zones où la présence de fioul Erika est nulle sont en bleu.

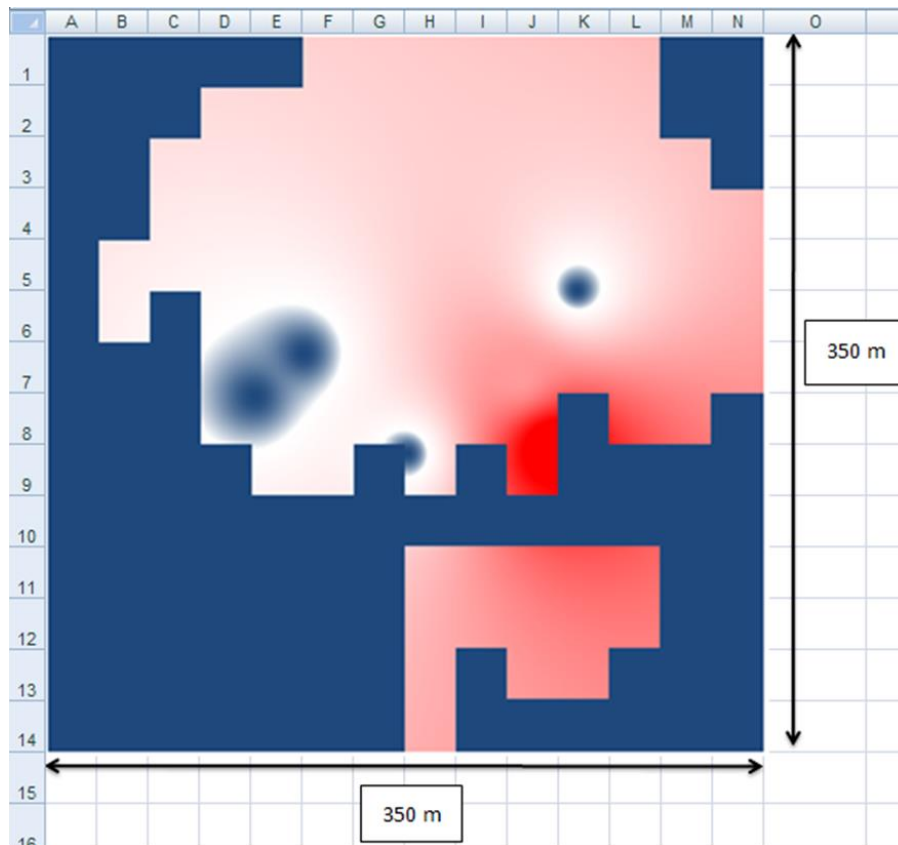


Figure 4 : Carte de la densité de fioul Erika dans la couche de 20 à 30 cm

Connaissant la masse de vase dans chaque cellule, l'estimation de la quantité de fioul Erika présent dans la couche entre 20 et 30 cm de vase dans le port d'échouage de Pornichet est de 19,4 t.

Cette estimation est élevée, tout simplement parce que nous ne disposons que de six mesures. Grossièrement, et ceci est facile à comprendre, à grande distance des six points, par exemple dans toute la région Nord-Ouest, l'estimation due à l'EPH n'est pas nulle, parce que l'influence des points où la pollution est forte se fait sentir. Certes, en chaque point de la zone, l'estimation de pollution est faible, mais ceci vaut pour une zone très large. En effet, la zone où la densité en pétrole Erika est supérieure à 1 000 mg d'HCT / kg de vase représente 76,2% de la surface de la couche, soit environ 48 500 m².

Cependant, la méthode de l'hypersurface probabiliste ne permet pas uniquement d'estimer une valeur déterministe, mais une loi de probabilité (chaque valeur déterministe est obtenue en déterminant l'espérance mathématique de chaque loi).

La loi de probabilité de chaque cellule n'est pas la même partout : près des valeurs observées, elle est fortement concentrée alors qu'elle devient plus diffuse dans les zones éloignées des mesures.

Par exemple, prenons le point de coordonnées (1 ; 126) situé à l'extrémité Nord-Ouest du port dans lequel aucune mesure n'a été effectuée. En utilisant, l'hypersurface probabi-

liste, l'espérance de la loi de probabilité obtenue à partir de la propagation des six mesures est de 1 708 mg d'HCT / kg de vase.

La loi de probabilité en ce point est représentée sur la figure 5 :

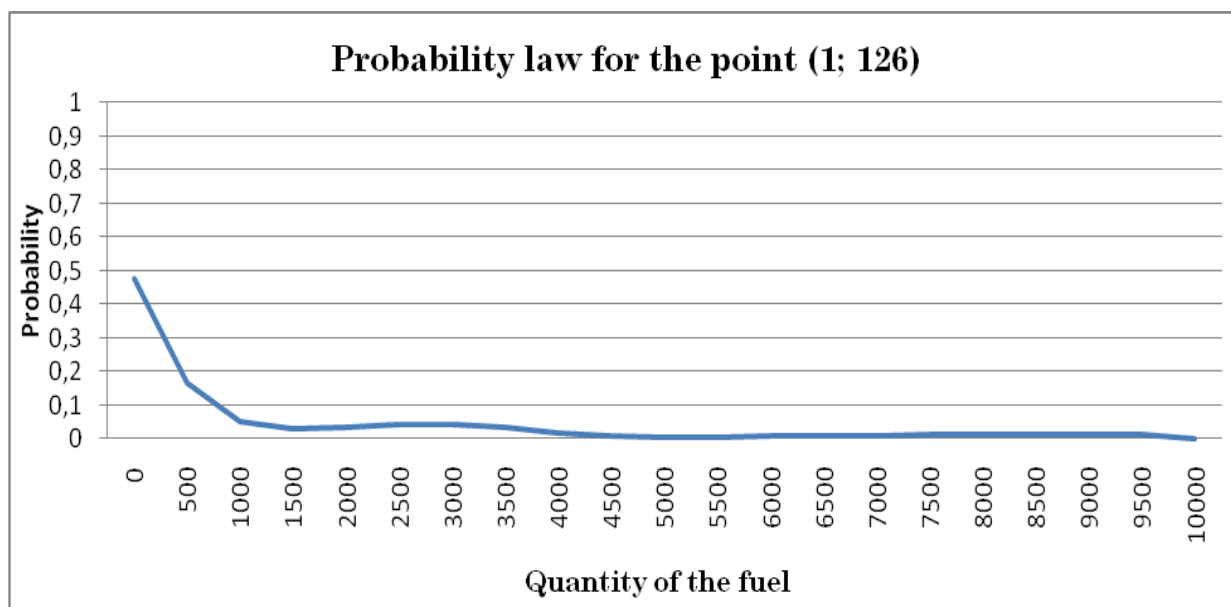


Figure 5 : Loi de probabilité de la densité de pétrole Erika au point de coordonnées (1 ; 126)

La probabilité que la densité en pétrole soit très faible est importante. Cependant, la loi n'étant pas assez concentrée vers les faibles valeurs du fait de l'éloignement par rapport aux mesures, la probabilité que cette zone soit fortement dense en fioul est non négligeable.

Par conséquent, la seule manière de connaître avec plus de précision la quantité de fioul Erika présent dans la couche de 20 à 30 cm est d'augmenter le nombre de mesures afin de vérifier l'ensemble de la zone et de limiter la distance entre les points de mesures et les points estimés.

3.3 Plan d'expérience pour la couche de 20 à 30 cm

3.3.1 Détermination de zones de risque

Pour choisir les zones du port où il est nécessaire d'effectuer de nouvelles mesures, la couche de 20 à 30 cm est délimitée en quatre zones en fonction du risque de présence de pétrole Erika.

Pour cela, nous fixons le seuil de 1 000 mg d'HCT / kg de vase. Les quatre zones (figure 6) ont les caractéristiques suivantes :

- La zone n°1 (en bleu) correspond à la surface de la couche pour laquelle la probabilité de dépasser le seuil est inférieure à 10%. Aucune mesure supplémentaire n'est nécessaire dans cette zone.
- La zone n°2 (en blanc) correspond à la surface de la couche pour laquelle la probabilité de dépasser le seuil est comprise entre 10% et 50%. Cette zone où l'information est minimale nécessite de réaliser des mesures de vérification. Nous suggérons de procéder à des mesures à un intervalle de 50 m.
- La zone n°3 (en jaune) correspond à la surface de la couche pour laquelle la probabilité de dépasser le seuil est comprise entre 50% et 90%. Dans cette zone, nous suggérons de procéder à des mesures à un intervalle de 25 m.
- La zone n°4 (en rouge) correspond à la surface de la couche pour laquelle la probabilité de dépasser le seuil est supérieure à 90%. Des mesures doivent être effectuées dans cette zone afin de limiter la surface de forte densité.

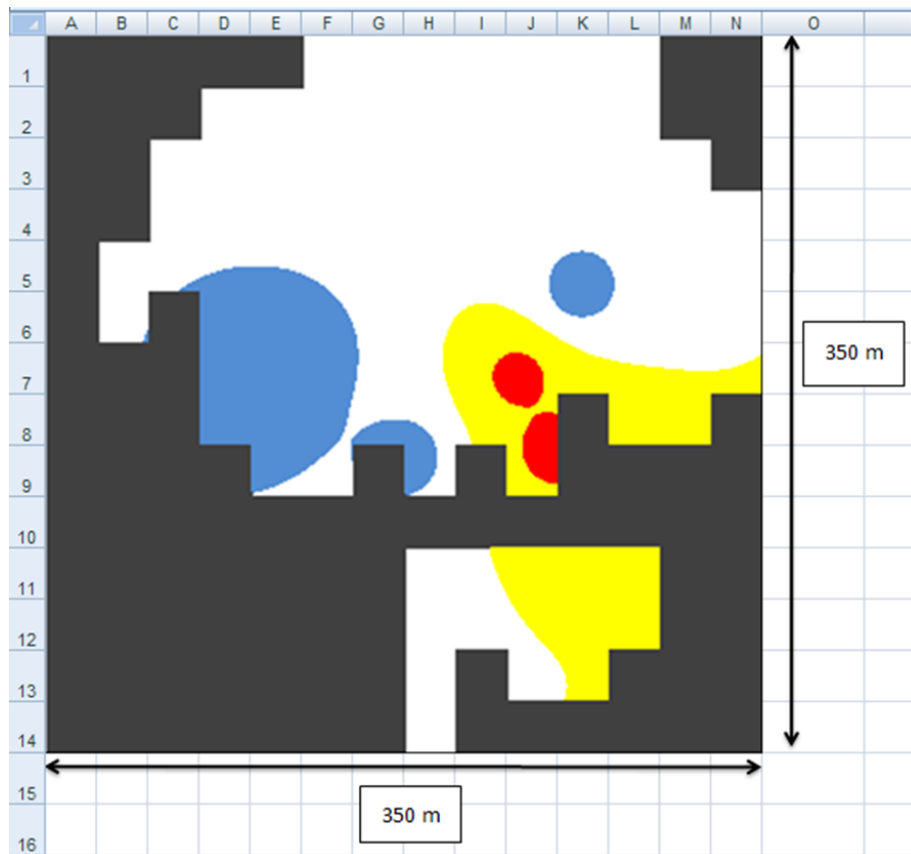


Figure 6 : Carte des 4 zones de risque de la couche de 20 à 30 cm

3.3.2 Simulation d'un plan d'expérience

Supposons que nous disposons d'un budget permettant de réaliser 20 mesures supplémentaires dans la couche de 20 à 30 cm du port de Pornichet.

Nous choisissons de simuler le plan d'expérience suivant :

- 10 mesures (en bleu) sont réalisées dans la zone n°2 située au Nord-Ouest du port avec un intervalle de 50 m ;
- 10 mesures (en jaune) sont réalisées dans la zone n°3 située autour de la zone où la densité est probablement la plus forte avec un intervalle de 25 m.

Les mesures sont réalisées au centre des mailles de 25 m de côté suivantes :

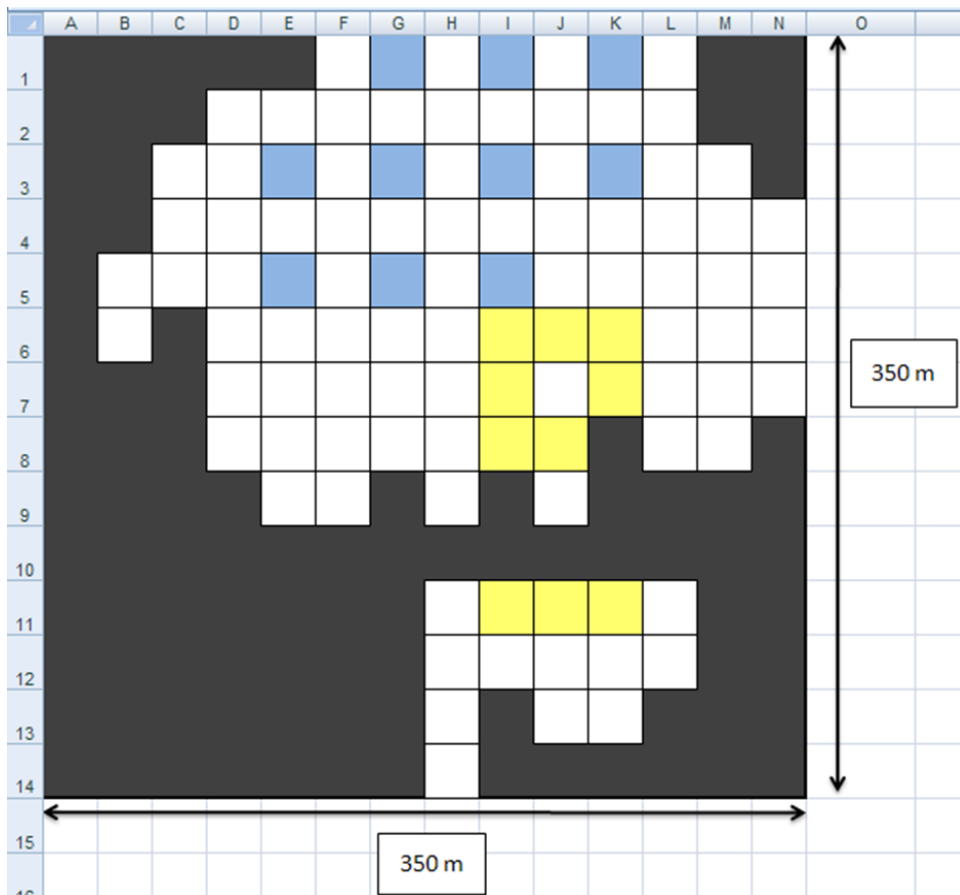


Figure 7 : Position des 20 points de mesures supplémentaires

En supposant que l'absence de pétrole provenant de l'Erika soit avérée pour les 20 points de mesure, nous utilisons la méthode de l'hypersurface probabiliste en affectant des densités nulles à tous les points supplémentaires.

On obtient une nouvelle carte du port (figure 8) en fonction de la densité de fioul Erika dans la couche entre 20 et 30 cm. La valeur maximale est indiquée en rouge, les zones où la présence de fioul Erika est nulle sont en bleu.

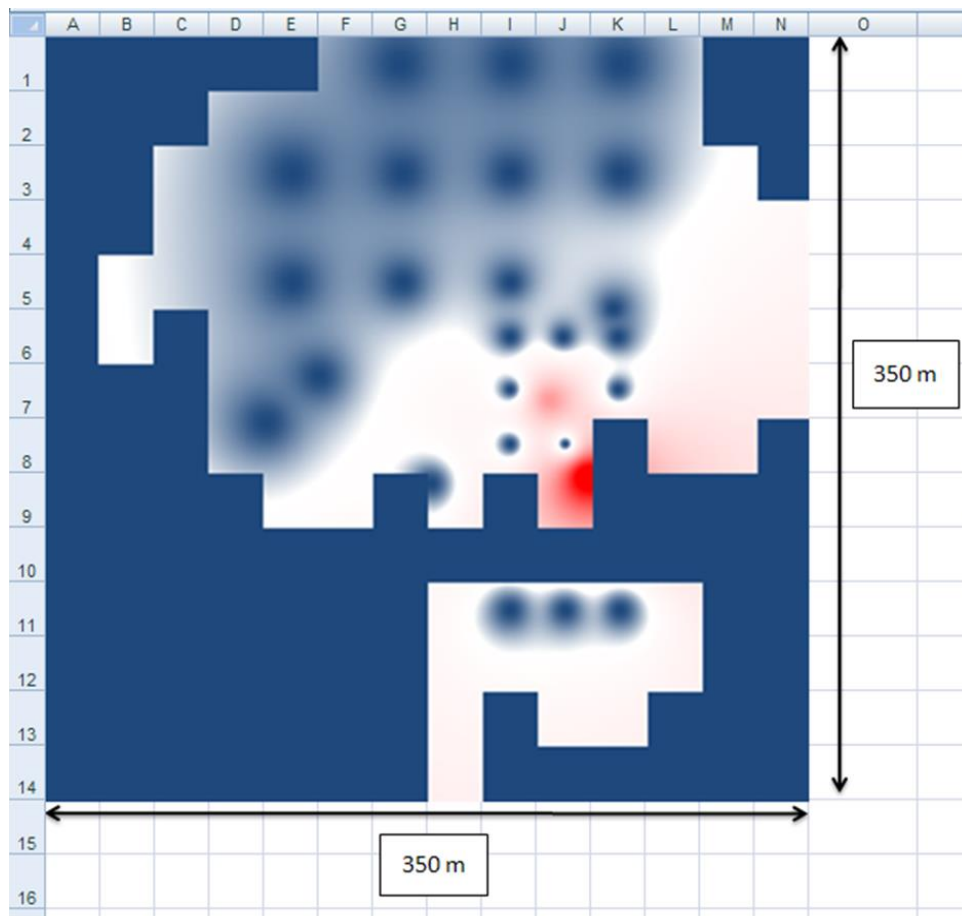


Figure 8 : Nouvelle carte de la densité de fioul Erika dans la couche de 20 à 30 cm suite à la simulation d'un plan d'expérience

Après la simulation du plan d'expérience, la nouvelle estimation de la quantité de fioul Erika présent dans la couche entre 20 et 30 cm de vase est de 3,6 t.

Dans ce cas, la quantité de fioul Erika présent dans le port d'échouage de Pornichet serait de 7 t.

4 Référence

Olga Zeydina et Bernard Beauzamy : Probabilistic Information Transfer. Ouvrage édité et commercialisé par la Société de Calcul Mathématique SA. ISBN: 978-2-9521458-6-2, ISSN : 1767-1175. Relié, 208 pages, mai 2013.