

1 1051 2 215

# COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

*INSTITUT de PROTECTION et de SURETE NUCLEAIRE*

## DEPARTEMENT DE PROTECTION SANITAIRE

RAPPORT DPS 84/03 SEAPS

METHODE POUR L'EVALUATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES  
LIEES AUX OPERATIONS D'IMMERSION DE DECHETS  
DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITE SUR LE FOND DE L'OCEAN

CALMET D., CHARMASSON S., DUMAS M.

DPS -- 84 - 03 - SEAPS .

METHODE POUR L'EVALUATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES  
LIEES AUX OPERATIONS D'IMMERSION DE DECHETS  
DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITE SUR LE FOND DE L'OCEAN

CALMET D., CHARMASSON S., DUMAS M.

CEA.IPSN  
Département de Protection Sanitaire  
Service d'Etudes Appliquées de Protection Sanitaire  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES

JANVIER 1984

R E S U M E

La méthode d'évaluation des conséquences sanitaires liées aux opérations d'immersion des déchets faiblement radioactifs sur le fond des océans présentée dans ce rapport repose classiquement sur l'étude des différentes voies de retour à l'homme des radionucléides immergés. Ces transferts sont décomposés en événements singuliers qui décrivent au mieux sept processus fondamentaux intervenant à un ou plusieurs niveaux dans les chaînes d'évènements (physique, chimique et biologique) mis en jeu. La modélisation des deux premières étapes des transferts libération et dilution dans le bassin océanique Nord-Atlantique des radionucléides est plus particulièrement développée.

-----

# S O M M A I R E

## INTRODUCTION

### I. METHODE D'EVALUATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES

- I.1 Schéma général d'un scénario en situation normale
- I.2 Schéma général d'un scénario en situation accidentelle
- I.3 Description des processus mis en jeu

### II. DESCRIPTION DES DIFFERENTS MODULES RETENUS

- II.1 Lixiviation des radionucléides
- II.2 La couche benthique limite
- II.3 La sédimentation
- II.4 La circulation océanique Nord-Atlantique
- II.5 La circulation littorale
- II.6 Les chaînes biologiques
- II.7 L'évaluation des doses à l'homme

## CONCLUSION

## INTRODUCTION

Ce rapport décrit les différents travaux initialisés au 4ème trimestre 1982, au sein du Service de Protection Sanitaire du Commissariat à l'Energie Atomique, à la demande de l'Echelon de Coordination et de Synthèse en matière de Déchets Radioactifs (CSDR), et concernant l'évaluation des conséquences sanitaires liées aux opérations d'immersion de déchets de faible activité sur le fond de l'océan. Conformément à la demande du CSDR, nous exposerons la méthodologie et les modèles susceptibles de répondre au mieux, dans le cadre des recommandations de l'AIEA [1a, 1b, 1c], de l'AEN [2, 3] et de la Convention de Londres [4], aux problèmes posés par l'évaluation des conséquences sanitaires tant de l'immersion des déchets de faible activité que de l'enfouissement des déchets de moyenne activité. En effet, comme nous le verrons plus loin, un grand nombre de processus, naturels ou non, sont communs à ces deux programmes.

Nous nous bornerons, dans ce rapport, à la présentation des chaînes de calcul conduisant à l'évaluation des conséquences radiologiques des opérations d'immersion (Figure n° 1) qui ne constituent qu'un des nombreux critères d'acceptabilité de ces programmes (Figure n° 2).

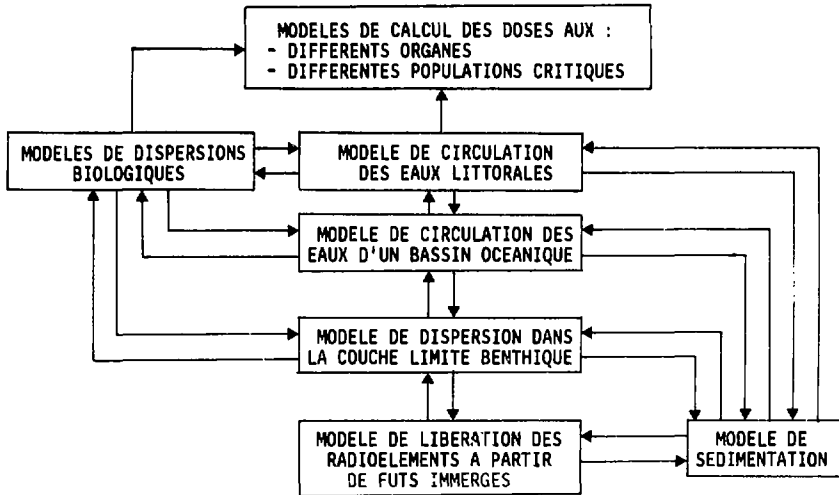


FIGURE n° 1 : LIAISONS DES DIFFERENTS MODELES PERMETTANT L'EVALUATION DES CONSEQUENCES DES OPERATIONS D'IMMERSION

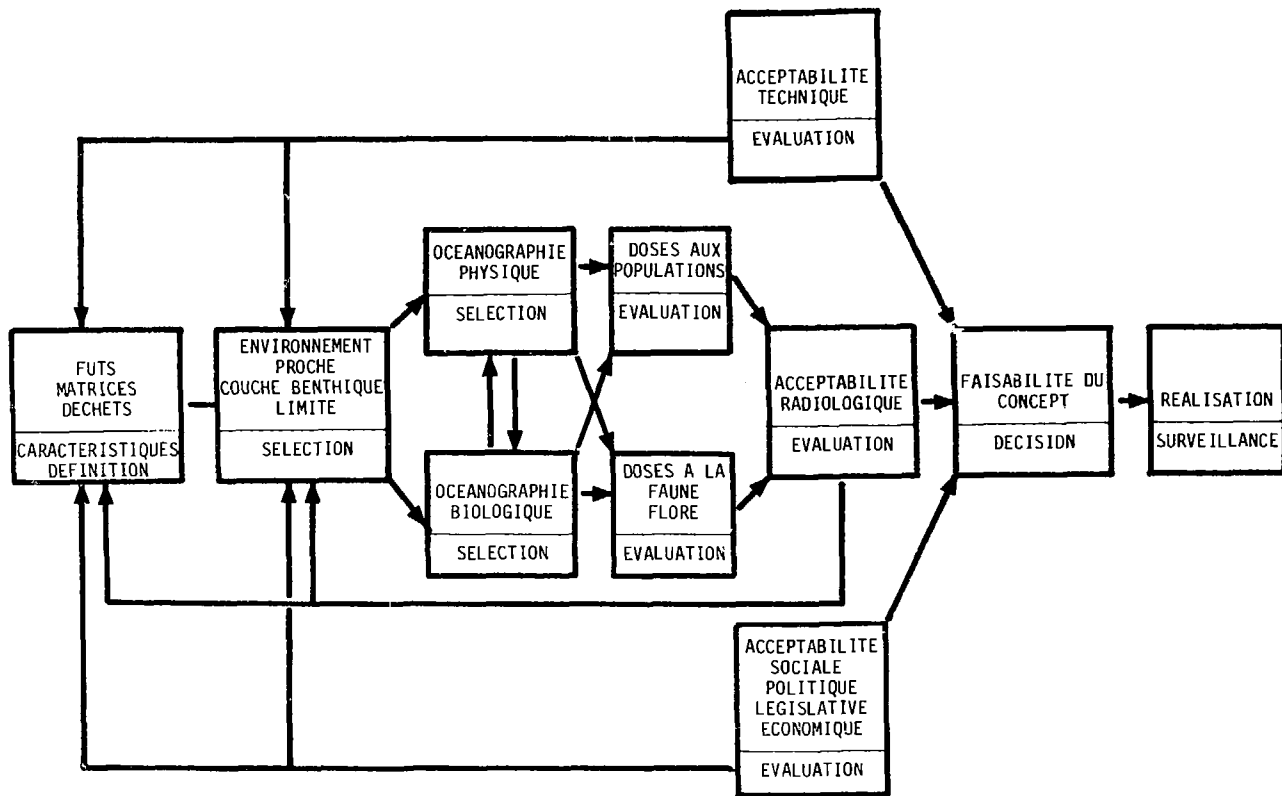


FIGURE n° 2 : SCHEMA GENERAL D'ACCEPTABILITES D'UN SITE D'IMMERSION DE DECHETS FAIBLEMENT RADIOACTIFS

## I. METHODE D'EVALUATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES

### I.1 Schéma général d'un scénario en situation normale

Le scénario des opérations d'immersion en situation normale débute, dans un port, par le chargement sur un navire de fûts renfermant des déchets radioactifs qui sont ensuite transportés sur le site préalablement défini par les autorités nationales responsables, et agréé par l'AEN. Les opérations en mer se terminent par l'immersion de la totalité de la cargaison sur le fond de l'océan, sans que l'intégrité des fûts soit altérée [2].

L'évaluation des conséquences sanitaires liées à ces opérations d'immersion demande alors l'identification des différents facteurs et processus régissant la libération, la dispersion et la reconcentration des radioéléments depuis leur abandon sur le fond de l'océan jusqu'à leur retour éventuel aux populations humaines, en relations directes ou indirectes avec l'océan. Après cette première étape purement qualitative, les processus clairement identifiés sont traités en termes probabilistes ; à chacun des événements, précédemment décrits, est associée une probabilité (ex. : probabilité de présence de tourbillons touchant l'ensemble de la colonne d'eau, probabilité de libération, de sédimentation d'un radioélément, etc...). Cette deuxième étape permet alors une comparaison de l'importance relative des différents événements dans le processus général étudié. En effet, les effets à long terme d'un facteur sur l'autre sont très souvent, imprévisibles.

Pour remédier à cette difficulté, il est nécessaire d'élaborer des modèles mathématiques formalisant les différents événements décrits et quantifiés en vue de l'évaluation finale des conséquences sanitaires, puis de conduire une analyse de sensibilité du modèle général aux variations des paramètres le caractérisant.

### I.2 Schéma général d'un scénario en situation accidentelle

Nous n'exposerons pas ici les scénarios accidentels susceptibles de se dérouler dans un port lors du chargement du navire ou lors de son départ, ni ceux pouvant intervenir durant son trajet jusqu'au site



d'immersion (échouage, collision). Ces scénarios dépendent d'un autre programme d'étude concernant l'ensemble des accidents maritimes répertoriés pour les eaux territoriales françaises. Le seul scénario considéré, dans un premier temps, est celui décrivant la libération des déchets faiblement radioactifs à même les eaux de surface par éclatement d'un ou de plusieurs fûts, lors du déchargement en mer. Cette hypothèse a pour principale conséquence d'initialiser le calcul des estimations des transferts directement au sein des masses d'eaux superficielles, supprimant l'effet de barrière et les systèmes tampons constitués par la paroi des fûts, les matrices englobant les déchets, les eaux profondes et les sédiments abyssaux. De fait, cette simplification conduit à une estimation pessimiste de la réalité d'un tel événement, puisque, compte tenu de la densité élevée des matériaux utilisés, la majeure partie de ceux-ci serait entraînée vers le fond des océans. Cependant, en regard de la complexité qu'entraîne l'évaluation fine d'un tel événement et de sa rapidité de déroulement (de l'ordre de l'heure) par rapport au temps nécessaire à la contamination de l'ensemble des masses d'eaux impliquées (de l'ordre de 30 à 50 ans), nous conserverons cette hypothèse de calcul résolument simplificatrice et pessimiste pour nos premières évaluations.

### 1.3 Description des processus mis en jeu

Nous avons suivi une approche systémique (analyse des systèmes) ; cette démarche déjà utilisée dans d'autres programmes d'évaluation des conséquences radiologiques liées aux activités humaines [5] permet la description mathématique d'un scénario décomposé en événements singuliers par un ensemble de modèles unitaires interconnectés. Cet ensemble modulaire a l'avantage de permettre une évolution indépendante de chaque modèle au gré de l'avancement des connaissances dans les différents domaines, sans remettre en cause la structure générale de la modélisation. C'est ainsi que nous pouvons ramener le problème de l'évaluation des conséquences sanitaires liées aux opérations d'immersion à une modélisation de 7 processus fondamentaux, intervenant à un ou plusieurs niveaux dans la chaîne d'événements susceptibles de ramener des radioéléments, abandonnés sur le fond de l'océan, jusqu'à l'homme (Figure n° 2). Nous élaborerons donc 7 modèles, de complexité très variable, décrivant :

- (1) la libération des radioéléments à partir des fûts

- (II) leur fixation temporaire au sein de la couche benthique limite
- (III) la dispersion des radionucléides au sein des masses d'eaux océaniques et
- (IV) littorales
- (V) l'intervention des mécanismes sédimentaires favorisant l'immobilisation des radioéléments par enfouissement progressif
- (VI) les phénomènes de reconcentration et de transfert par les différents échelons des chaînes trophiques conduisant ou non à l'homme
- (VII) l'exposition des populations identifiées.

Chaque module, que nous allons maintenant décrire sommairement, sera caractérisé par des données d'entrée et de sortie pour chaque radioélément considéré, et ce pour les différents vecteurs mis en évidence. Les données de sortie d'un module servent de données d'entrée au module suivant, jusqu'au module final.

## II. DESCRIPTION DES DIFFERENTS MODULES RETENUS

### II.1 Lixiviation des déchets

La dislocation des fûts au contact du fond de l'océan n'est pas une hypothèse réaliste dans un scénario de destruction de la première barrière [6] représentée par la paroi des fûts. De fait, celle-ci est reconnue actuellement comme irréaliste [7, 8]. Le scénario retenu comme le plus probable et le plus proche de la réalité consiste en une lente destruction du conteneur provoquée par la corrosion à l'eau de mer. En effet, les fûts semblent présenter une bonne résistance à la corrosion [9].

Il n'est pas possible de considérer que le phénomène de lixiviation est congruent. Il faut, en effet, prendre en compte le transport des radioéléments de l'ensemble du volume vers la surface de la matrice par diffusion et, surtout, le phénomène de destruction du conteneur par corrosion. Celle-ci n'est pas uniforme sur toute sa surface, mais se trouve localisée sur la partie la plus superficielle, provoquant des cavités. Cette corrosion augmente donc la surface de lixiviation de façon importante, 10 % de la surface des fûts est corrodée sur 15 ans d'après des travaux japonais récents [35].

Les données qualitatives et quantitatives concernant les déchets immergés sont précisées par les autorités nationales responsables des opérations d'immersion. Compte tenu des tendances actuelles [10], trois sortes de matrice seront envisagées : le béton, les résines et les bitumes. De nombreux travaux expérimentaux ayant pour objet la détermination des taux de lixiviation de radioéléments déposés dans ces trois types d'enrobage ont été effectués. Cependant, il en existe peu dont le lixiviant soit l'eau de mer. Les taux de lixiviation dus à l'eau de mer seraient plus élevés que pour de l'eau douce, en particulier pour les formes Césium [11].

Si on note  $K_1$  le taux de lixiviation d'un radioélément, sous des formes physique et chimique données, et un lixiviant présentant des caractéristiques physique et chimique connues, dans un support choisi : béton, bitume ou résine, la fraction d'activité entraînée, hors de la première barrière, par lixiviation pendant le laps de temps  $dt$ , au temps  $t$ , s'écrira, compte tenu de la décroissance radioactive :

$$C_0(t + dt) - C_0(t) = [C_0(t) \cdot K_1 G(t) - \lambda C_0(t)] \cdot dt$$

où  $C_0(t)$  est l'activité présente au temps  $t$

$G(t)$  est la surface contaminée du conteneur en contact avec l'eau.

Cette surface est initialement nulle. Elle est déterminée à partir des expériences de lixiviation, pour les premières années d'immersion et par modélisation ensuite.

Lorsque le temps tend vers l'infini, cette surface tend également vers l'infini ce qui équivaut à la dissolution complète du conteneur.

La fraction d'activité relachée peut donc être déterminée à partir de la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{d C_0(t)}{C_0(t)} = [K_e G(t) - \lambda] dt \quad [12]$$

## II.2 La couche benthique limite

La couche benthique limite (CBL), correspond au niveau le plus profond des océans constitué par l'interface eaux profondes-sédiments.

Dans le cadre de cette étude elle incorporera, certes de façon abusive, le néphéloïde profond, qui est la couche d'eau turbide se déplaçant au voisinage du fond. Dans un but simplificateur nous estimerons que cette couche débute à - 1 m sous la surface des sédiments et qu'elle se termine à plusieurs centaines de mètres au-dessus du niveau superficiel de ceux-ci [13]. Des données récentes spécifiques du site Nord-Atlantique révèlent que la CBL peut atteindre jusqu'à 1 000 m d'épaisseur dans cette région [8].

Cette couche constitue un système tampon entre les fûts et les eaux océaniques moins turbides. Le problème est donc d'évaluer la valeur des facteurs régissant la mise à l'équilibre des radioéléments entre les phases particulaires et l'eau de mer, en particulier entre l'eau interstitielle, les sédiments et l'eau sus-jacente.

Il apparaît que la remobilisation des radionucléides à partir des sédiments peut avoir des conséquences radiologiques pour l'homme en ce qui concerne les éléments caractérisés par une longue période d'activité [14]. Les constantes d'équilibres régissant les échanges eaux-sédiments sont quantifiées expérimentalement, des mesures "spécifiques" du site peuvent être fournies à partir des sédiments prélevés dans la zone d'immersion [15].

Nous reviendrons sur les termes régissant les échanges eaux-particules, dans la description des processus sédimentaires (§ II.3). Le terme décrivant la bioturbation, c'est-à-dire les possibilités de remise en suspension des radioéléments par l'activité biologique d'organismes en contact avec les sédiments, sera également inclus dans ce module [16, 17].

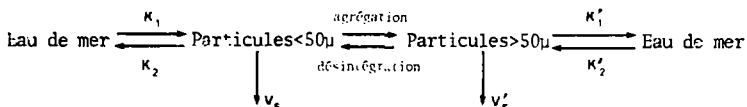
### II.3 La sédimentation

Les processus sédimentaires interviennent dans le transport des radioéléments associés aux particules en suspension, des couches d'eaux les plus superficielles vers les niveaux plus profonds. La connaissance de ces processus passe par la détermination des taux de sédimentation, de la charge particulaire des différentes masses d'eau en présence et des coefficients de distribution des différents radioéléments entre les particules et l'eau environnante [16]. Comme nous venons de le décrire

pour les phénomènes intervenant au sein de la CBL, les échanges entre l'eau et les particules (adsorption et dissolution) seront considérés, en première approximation, comme partiellement ou complètement réversibles et régis par une réaction du 1er ordre qui peut être exprimée par :

$$K_d = \frac{K_1}{k_2} \cdot \frac{1}{F} \quad \text{ou} \quad \begin{array}{l} K_1 = \text{constante d'adsorption} \\ K_2 = \text{constante de dissolution} \\ F = \text{concentration des particules} \end{array}$$

Les coefficients de distribution mesurés à l'équilibre sont variables suivant les conditions physico-chimiques du milieu et, en particulier, il semble que l'augmentation de pression avec la profondeur puisse jouer un rôle assez important (multiplication des valeurs de  $K_d$  par 2 pour une augmentation de 1 000 bars et ce pour l'américium 241). Considérant deux populations de taille de particules, nous conviendrons de traduire le phénomène étudié par le diagramme suivant :



où  $V_s$  et  $V'_s$  correspondent aux vitesses moyennes de sédimentation associées aux deux tailles de particules. Les valeurs de  $K_d$  sont disponibles pour un assez grand nombre de radioéléments [18].

#### 11.4 La circulation océanique Nord-Atlantique

Les radioéléments "libérés" par la CBL vont ensuite être repris et dispersés dans l'océan mondial par l'intermédiaire des courants marins et plus généralement par les processus d'advection-diffusion. Nous avons décidé de limiter, dans un premier temps, notre domaine d'étude au bassin Nord-Atlantique, bassin qui renferme la zone d'immersion (Figure n° 3) donc le plus directement concerné par d'éventuelles contaminations. D'autre part, cette délimitation permet une résolution appropriée à notre problème, à la fois dans le temps et dans l'espace, des caractéristiques hydrologiques majeures de ce bassin. Ces critères nous ont fait rejeter l'approche des premiers modèles à compartiments proposés [19] pour nous axer sur des modèles plus complexes décrivant les

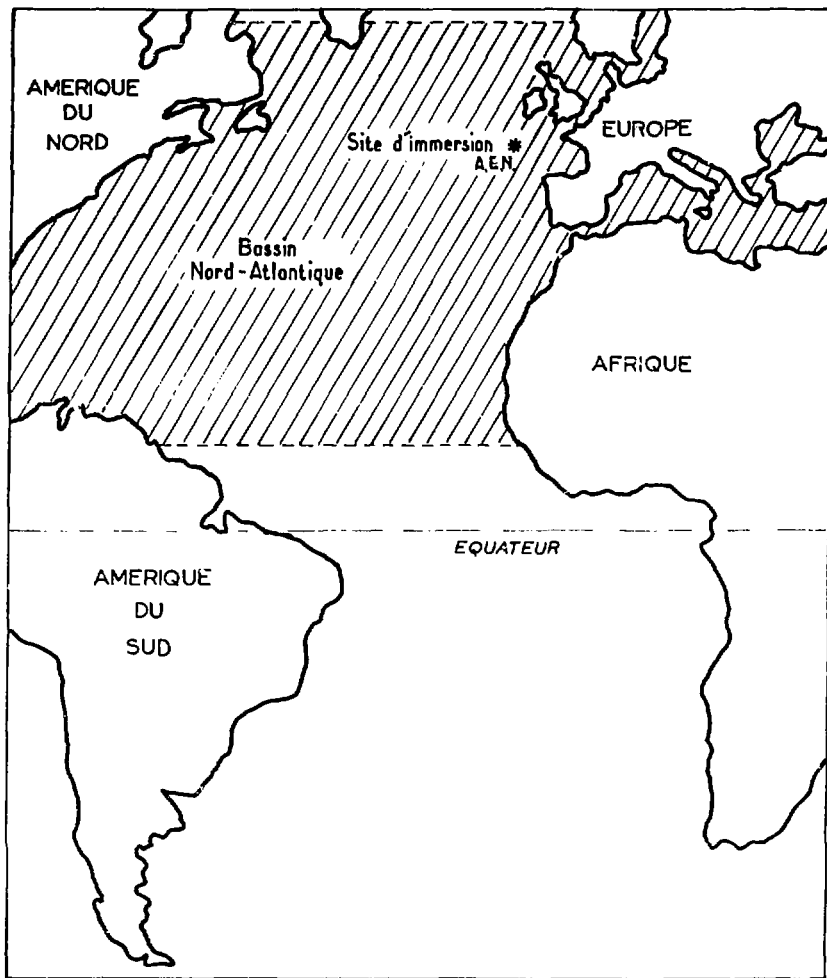


FIGURE n°3: Domaine retenu pour l'étude de la circulation océanique dans le bassin Nord Atlantique.

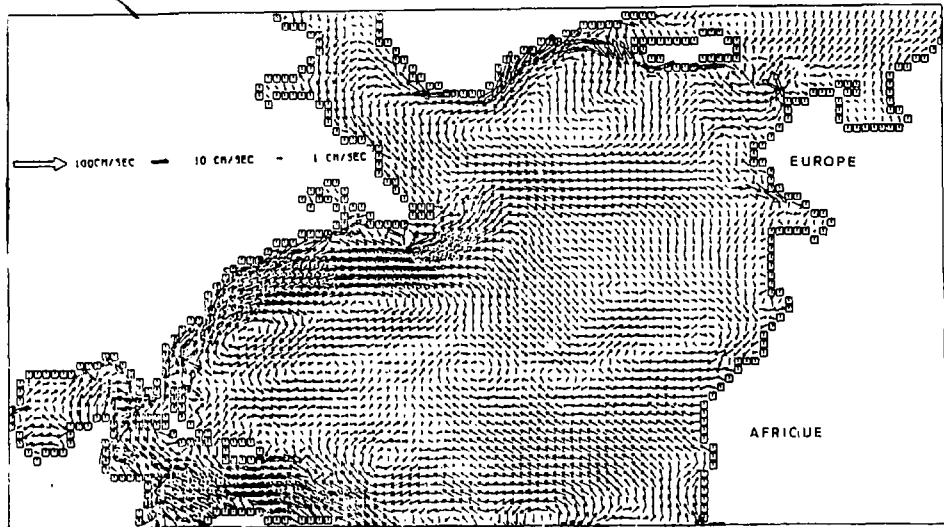


FIGURE n°4: Champ de courants obtenu à -25 mètres pour des conditions estivales d'après le modèle de Bryan-Semtner ( Rapport du groupe de travail 'modélisation', La Spezia, Mars 1983).

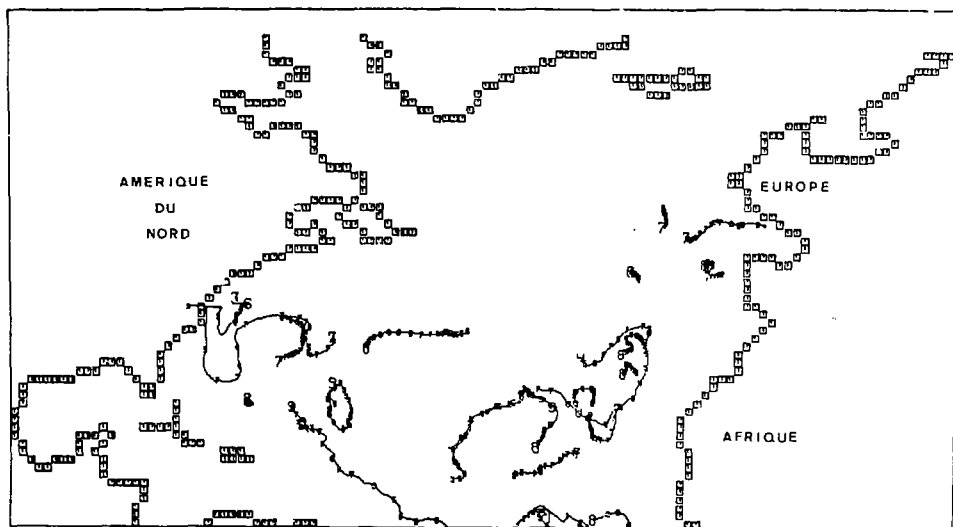


FIGURE n°5: Trajectoires lagrangiennes sur 20 ans de particules à différentes profondeurs d'après le modèle de Bryan-Semtner ( Rapport du groupe de travail 'modélisation', La Spezia, Mars 1983).

champs de courants saisonniers établis non pas sur des mesures directes in situ de ces derniers, mais dérivés mathématiquement des profils verticaux et horizontaux de salinité et de température, observés lors de campagnes de mesures à la mer. Ces dernières mesures sont plus fiables que celles des enregistrements courantométriques directs. De plus, cette approche fournit des champs de courants suffisamment denses pour autoriser une recherche théorique de nouveaux sites d'immersion, par des simulations de trajectoires de particules utilisées comme traceurs lagrangiens, avantage non négligeable qui permet d'envisager son utilisation dans le cadre d'une prospection pour l'ensemble des programmes d'abandon des déchets radioactifs en mer (Figures n° 4 et 5). Nous développerons ici plus particulièrement ce module de l'analyse générale, car il représente un travail nouveau au sein du DPS et fait l'objet d'une étude approfondie à l'heure actuelle avec l'équipe d'océanographie physique du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.

Ces dernières années ont vu un rapide développement des modèles numériques de circulation atmosphérique [20, 21, 22] et océanique [23, 24, 25, 26] et même de circulation couplée océan-atmosphère [27, 28, 29].

Une modélisation numérique comporte, en général, trois aspects :

- l'analyse des phénomènes physiques que l'on cherche à examiner et la détermination d'un système d'équations, en général aux dérivées partielles, qui permet de les modéliser ;
- la recherche d'un algorithme numérique qui doit permettre d'obtenir une solution approchée de ces équations ;
- la programmation, c'est-à-dire la traduction en langage informatique de l'algorithme choisi.

Les modèles numériques de la circulation des océans visent à reproduire la distribution tri-dimensionnelle, à grande échelle, de la densité (c'est-à-dire des distributions de température et de salinité) aussi bien que des champs de courants dans un bassin océanique, les conditions thermohalines et d'action du vent à la surface de la mer étant données.

Les équations de base du modèle sont les équations fondamentales de la mécanique des fluides, c'est-à-dire les équations de Navier-Stokes



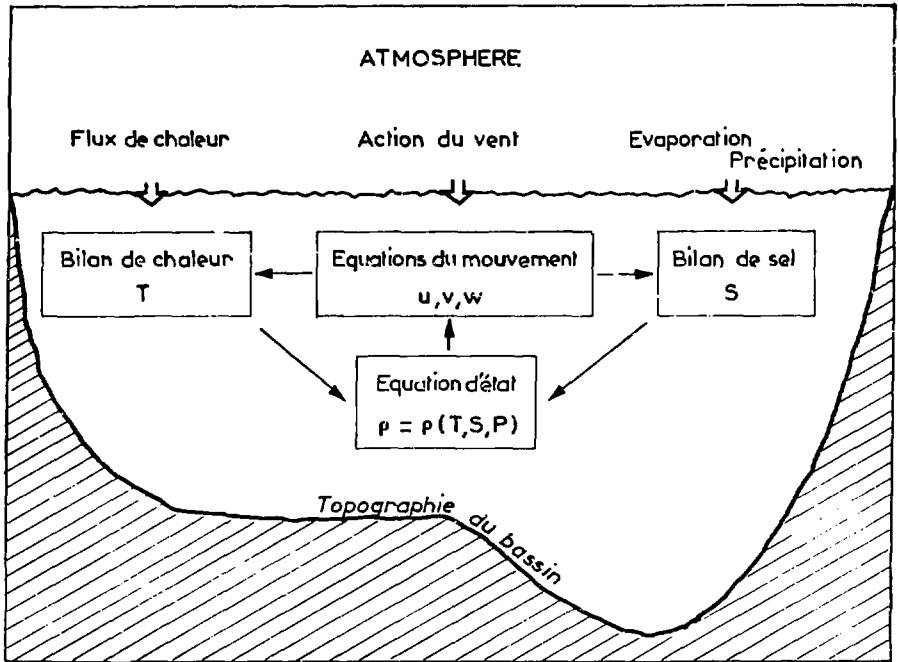


Figure n°6: Diagramme schématique montrant les différents éléments intervenant dans les modèles de circulation océanique à grande échelle (modifié d'après Holland, 1977).

ainsi que les équations de conservation de la masse, de chaleur et de sel.

Notre choix s'est porté sur le modèle océanique développé par BRYAN et ses collaborateurs [30, 31, 32, 23] et repris par SEMTNER [25]. Nous développerons ici uniquement la partie concernant l'analyse des phénomènes physiques et la détermination d'un système d'équations approprié.

Sur la figure n° 6 nous avons porté les éléments les plus importants de ce modèle. En fait, la plupart des modèles numériques ont été par la suite réalisés avec des variantes de ce schéma de base (voir annexe).

#### II.5 La circulation littorale

La circulation littorale intervient dans les mêmes processus de dispersion des radionucléides que précédemment, mais au sein des masses d'eau recouvrant le plateau continental. La modélisation de cette circulation est en cours de réalisation pour la Manche et le plateau continental européen, et ce dans le cadre des modèles d'évaluation des conséquences sanitaires des rejets liquides des installations nucléaires côtières (Windscale, La Hague et les centrales électronucléaires) d'une part et celles liées aux accidents maritimes d'autre part en particulier, les échouages et/ou collisions suivis d'explosions de navires à propulsion nucléaire ou transportant des cargaisons de matières radioactives.

Les processus mis en jeu dans ce type de circulation sont évidemment d'un ordre de grandeur très différent des précédents, ce qui entraîne un problème de couplage des résultats de la modélisation de ces deux zones qui devra être résolu.

#### II.6 Les chaînes biologiques

Les différents organismes marins susceptibles d'incorporer des radionucléides issus des fûts immergés peuvent être considérés comme des vecteurs de radioéléments au sein des masses d'eau d'une part et "le long" des chaînes trophiques conduisant à l'homme d'autre part. La connaissance qualitative et quantitative de la faune et de la flore des

zones marines intéressées permet la définition des éléments les plus représentatifs en biomasse et/ou entrant dans la consommation alimentaire humaine. L'écologie et l'éthologie de ces organismes étant acquises (migration, reproduction,...); il est possible, compte tenu des niveaux de contamination des eaux (calculés) et des facteurs de concentration (obtenus expérimentalement) associés aux taux d'assimilation et d'excrétion, d'évaluer les niveaux de contamination de ces organismes.

La rareté actuelle des données in situ concernant les descriptions qualitatives et surtout quantitatives, de la faune des grands fonds pose un problème de connaissances fondamentales qui devrait s'estomper avec l'ensemble des campagnes à la mer prévues sur le site d'immersion de l'AEN [33, 34]. Par contre, la panoplie actuelle des facteurs de transfert associés aux différents groupes zoologiques et floristiques, est déjà suffisante pour caractériser cet ensemble de mécanismes dont la modélisation est déjà acquise au sein de notre Institut.

#### II.7 L'évaluation des doses à l'homme

Cette évaluation finale est effectuée par l'intermédiaire de la nourriture d'origine marine, de l'inhalation d'aérosols marins et de l'irradiation externe par contact avec de l'eau de mer : ces trois sources d'exposition potentielle sont considérées comme étant uniquement dues aux radionucléides issus des déchets immergés sur le site de l'AEN. Ces différentes voies d'atteintes et l'évaluation des doses aux populations étant classiquement définies [14, 15], nous ne les développerons pas ici. Nous montrerons, cependant, la nécessité d'adapter ces voies de transfert à l'homme pour le programme d'immersion, en particulier en utilisant les fichiers de pêches FAO et les banques de données européennes sur la consommation des produits alimentaires d'origine marine.

#### CONCLUSION

Ce rapport présente la méthodologie qui sera utilisée pour l'évaluation des conséquences sanitaires liées aux opérations d'immersion des déchets de faible activité sur le site de l'AEN dans l'océan Nord-Est Atlantique, étude initialisée au DPS au dernier trimestre 1982.

Nous avons choisi de développer un code de calcul modulaire dont chacun des modules décrit les principaux processus de transferts des radioéléments, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques, depuis le fond de l'océan jusqu'aux populations concernées par ces opérations d'immersion. Cette approche, classique en analyse des systèmes, permet de traiter chaque thème séparément et d'apporter des modifications en fonction de l'évolution des connaissances dans chacun des domaines.

La construction de chaque module est, ou sera, l'objet de collaborations avec des spécialistes français ou étrangers. C'est ainsi que l'étude du module décrivant la circulation océanique Nord-Atlantique est abordé à l'aide d'un code de calcul élaboré aux Etats-Unis et mis à notre disposition par un laboratoire d'océanographie physique français. De même, l'analyse systémique retenue est conforme à l'esprit des groupes de travail réunis par l'AEN sur le thème de l'immersion. Le choix des paramètres introduits dans les modèles ainsi que les données de terrain retenues relèvent également d'un consensus des spécialistes de ces différents groupes.

En ce qui concerne l'état d'avancement des travaux théoriques qui ont débuté au cours du dernier trimestre 1982, nous avons identifié l'ensemble des chaînes de transferts en cause, établi les structures de base du modèle général et défini les techniques mathématiques les plus adaptées pour évaluer les taux de transfert entre les différents modules du modèle général. A l'heure actuelle, l'accent est porté sur la formalisation mathématique et la réalisation informatique des processus de transferts physiques associés à la circulation océanique Nord-Atlantique.

L'analyse du sujet dans son ensemble, associée à une enquête bibliographique, nous a également conduit à conseiller le choix d'études expérimentales *in situ* correspondant à certaines lacunes dans la description des processus naturels susceptibles d'être modélisés. Ainsi, en liaison avec l'élaboration du module sur la circulation océanique, une étude d'images satellitaires infra-rouges concernant les fréquences d'occurrence de tourbillons à grande échelle au voisinage du site d'immersion AEN est en cours. De même, deux autres études ont été requises dans le domaine biologique, l'une visant à qualifier les populations microbiennes à l'interface eaux-sédiment et à en quantifier l'activité métabolique, l'autre devant permettre d'approfondir nos connaissances

sur la biomasse de la méiofaune benthique profonde. Cet ensemble de travaux, tant théoriques qu'expérimentaux, devrait permettre de progresser rapidement dans l'élaboration du modèle au cours des 5 prochaines années.

-----

A N N E X E

Equations fondamentales du modèle

Le modèle est formulé en coordonnées sphériques, pour un océan incompressible, de lignes de côte et de topographie du fond arbitraires, et pouvant comporter des îles.

Considérons la terre comme étant une sphère de rayon  $a$ , tournant avec une vitesse angulaire  $\Omega$  et un système de coordonnées sphériques avec  $\lambda$ ,  $\psi$  et  $z$  représentant la longitude, la latitude et la hauteur. L'océan est contenu entre la surface où  $z = 0$  et le fond où  $z = -H$ , où  $H$  est une fonction connue de  $\lambda$  et  $\psi$ . Sept variables spécifient les conditions physiques de l'océan :

- les 3 composantes de la vitesse ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ )
- la pression  $P$
- la densité  $\rho$
- la température potentielle  $T$
- la salinité  $S$

Plusieurs approximations seront faites pour simplifier ces équations :

- 1) Le modèle est basé notamment sur les approximations de Boussinesq, c'est-à-dire que les variations de la masse spécifique  $\rho$  sont considérées comme négligeables sauf dans les termes de pesanteur où  $\rho$  est multiplié par  $g$ .
- 2) L'approximation hydrostatique : l'accélération locale et les autres termes du même ordre sont négligés dans l'équation du mouvement pour la composante  $w$ , la réduisant à l'approximation hydrostatique ; autrement dit, on suppose que les accélérations verticales sont négligeables devant l'accélération de la pesanteur.
- 3) Nous supposons, en outre, que l'océan est incompressible.

4) Seuls les mouvements à grande échelle sont traités explicitement et les actions exercées par les mouvements à plus petite échelle sont prises en compte par l'introduction d'une viscosité virtuelle ou turbulente.

On considère, d'autre part, que l'océan est un fluide horizontalement isotrope avec des coefficients de viscosité turbulente  $K$  et  $A_M$  constants dans les directions verticale et horizontale respectivement.

De même, on suppose que les transferts, à petite échelle, de sel et de chaleur sont pris en compte par l'utilisation de coefficients de diffusion turbulente  $K$  et  $A_H$  constants.

5) Enfin, on négligera dans les équations de la quantité de mouvement, compte tenu de l'ordre de grandeur de la composante  $w$ , les termes de Coriolis et de viscosité dans lesquels elle intervient.

Ces hypothèses et ces approximations permettent d'écrire les équations de base du modèle comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + Lv - \frac{uv \operatorname{tg} \psi}{a} - fv = - \frac{1}{\rho_0 \operatorname{acos} \psi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_M \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \psi)u}{a^2} - \frac{2 \sin \psi}{a^2 \cos^2 \psi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + Lv + \frac{u^2 \operatorname{tg} \psi}{a} + fu = - \frac{1}{\rho_0 a} \frac{\partial P}{\partial \psi} + K \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_M \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \psi)v}{a^2} + \frac{2 \sin \psi}{a^2 \cos^2 \psi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \rho g \quad (3)$$

Ces équations représentent les équations de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{1}{\operatorname{acos} \psi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{\operatorname{acos} \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} (v \cos \psi) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4) \text{ Equation de continuité ou de conservation de la masse}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + LT = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A_H \nabla^2 T \quad (5) \text{ Equation de conservation de chaleur}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + LS = K \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + A_H \nabla^2 S \quad (6) \text{ Equation de conservation de sel}$$

$$\rho = \rho(T, S, P)$$

(7) Equation d'état non linéaire

avec

$$L(\sigma) = \frac{1}{a \cos \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u \sigma) + \frac{1}{a \cos \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} (\cos \psi v \sigma) + \frac{\partial}{\partial z} (w \sigma) \quad (8) \quad \text{opérateur d'advection}$$

$$\nabla^2(\sigma) = \frac{1}{a^2 \cos^2 \psi} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} (\cos \psi \frac{\partial \sigma}{\partial \psi}) \quad (9) \quad \text{opérateur Laplacien horizontal}$$

$$f = 2 \Omega \sin \psi$$

(10) paramètre de Coriolis

### Les conditions aux limites

→ La configuration de l'océan est définie par la connaissance de la profondeur  $H(\lambda, \psi)$ .

→ Les conditions aux limites latérales pour la vitesse, la température et la salinité sont :

$$u, v, T_n, S_n = 0 \quad (11)$$

où  $n$  indique la dérivée dans la direction de la normale aux murs latéraux.

→ La surface de l'océan est considérée comme représentant "un toit rigide horizontal", c'est-à-dire que :

$$w = 0 \quad \text{à} \quad z = 0 \quad (12)$$

Cette hypothèse permet d'une part un filtrage des ondes de gravitation externes et d'autre part de prendre un pas de temps plus grand dans la discrétisation des calculs.

A la surface de l'océan, l'action du vent et les flux de chaleur et de sel sont donnés à partir d'observations ou de modèles atmosphériques

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 K \frac{\partial}{\partial z} (u, v) &= (\tau^{\lambda}, \tau^{\psi}) \\ \rho_0 K \frac{\partial}{\partial z} (T, S) &= (F^T, F^S) \end{aligned} \right\} \quad \text{à} \quad z = 0 \quad (13)$$



(la précipitation et l'évaporation existant au niveau de l'océan "réel" sont traitées en terme de flux équivalent de sel dans le modèle océanique, car nous n'avons pas de transfert de masse d'eau à travers la surface).

→ Au fond de l'océan, les très petits effets des flux de chaleur géothermiques sont négligés et nous avons :

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 K \frac{\partial}{\partial z}(u, v) &= 0 \\ \rho_0 K \frac{\partial}{\partial z}(T, S) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{à } z = -H(\lambda, \phi) \quad (14)$$

D'autre part, le flux doit être parallèle au fond de l'océan soit :

$$w = \frac{-u}{a \cos \phi} \frac{\partial H}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial H}{\partial \phi} \quad (15)$$

### Résolutions des équations

Toute quantité  $q$  peut être décomposée en la somme de deux termes : l'un représentant sa moyenne verticale et l'autre sa déviation par rapport à cette moyenne.

Ainsi, les composantes de la vitesse peuvent être exprimées sous la forme :

$$(u, v) = (\bar{u}, \bar{v}) + (\hat{u}, \hat{v})$$

Les composantes  $(\bar{u}, \bar{v})$  peuvent être écrites en terme de fonction de courant  $\Psi$  de transport de volume pour le flux intégré verticalement comme suit :

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 u dz = -\frac{1}{Ha} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} \quad (16)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 v dz = \frac{1}{Ha \cos \phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \quad (17)$$

L'existence de la fonction  $\Psi$  est garantie par la nature non divergente du flux intégré sur la verticale, soit :

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \int_{-H}^0 u dz \right) + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \cos \phi \int_{-H}^0 v dz \right) = 0$$

Cette relation est déduite de l'intégration de l'équation de continuité (4) et de l'application des conditions (12) à la surface et (15) au fond.

Les composantes  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$  seront donc déterminées directement à partir du champ  $\Psi$ .

Une équation prédictive pour  $\Psi$  est obtenue en prenant les moyennes verticales des équations de conservation de quantité de mouvement (1) et (2) et en utilisant la relation suivante :

$$P(z) = P_S + \int_z^0 \rho g \, dz' \quad (18)$$

déduite de la relation hydrostatique (3) et qui montre qu'à toute profondeur, la pression est composée de la pression au niveau du couvercle rigide ( $P_S$ ) et d'une partie hydrostatique.

Nous obtenons ainsi :

$$\frac{-1}{Ha} \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right) - \frac{f}{Ha \cos \psi} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} = \frac{-1}{a r_0 \cos \psi} \frac{\partial P_S}{\partial \lambda} - \frac{g}{Ha \rho_0 \cos \psi} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} dz' dz + \frac{1}{H-H} \int_{-H}^0 G^\lambda dz \quad (19)$$

$$\frac{1}{Ha \cos \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right) - \frac{f}{Ha} \frac{\partial \Psi}{\partial \psi} = \frac{-1}{a \rho_0} \frac{\partial P_S}{\partial \psi} - \frac{g}{Ha \rho_0} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \psi} dz' dz + \frac{1}{H-H} \int_{-H}^0 G^\psi dz \quad (20)$$

où  $G^\lambda$  et  $G^\psi$  représentent les contributions des termes non-linéaires et de viscosité dans les équations (1) et (2).

Mais nous ne disposons pas d'équation prédictive pour  $P_S$  et ce terme doit être éliminé des équations.

Ceci est réalisé par l'application de l'opérateur rotationnel défini par :

$$\text{rot}_z (q_1, q_2) = \frac{1}{a \cos \psi} \left[ \frac{\partial q_2}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \psi} (q_1 \cos \psi) \right] \quad (21)$$

Après simplification, en éliminant  $1/a^2 \cos \phi$ , on obtient l'équation suivante qui est une équation prédictive pour  $\psi$ .

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{1}{H \cos \phi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\cos \phi}{H} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi \partial t} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{f}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \right) \right] = \\ & - \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{g}{\rho_0 H} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \psi} dz' dz \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{g}{\rho_0 H} \int_{-H}^0 \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} dz' dz \right) \right] \\ & + \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{a}{H} \int_{-H}^0 G^\psi dz \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{a \cos \phi}{H} \int_{-H}^0 G^\lambda dz \right) \right] \end{aligned} \quad (22) \text{ Equation appelée également équation de vorticité}$$

On doit, maintenant, définir des équations prédictives pour  $u'$  et  $v'$ . Une méthode relativement simple est de considérer les équations (1) et (2) avec substitution de l'équation (18) à la place du terme de pression, en considérant que la pression à la surface  $P_s$  est temporairement nulle :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} + Lu - fv - \frac{uvtg\phi}{a} &= \frac{-g}{\rho_0 a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \int_z^0 \rho dz \right) + K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ &+ A_M \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1-tg\phi)u}{a^2} - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} \\ \frac{\partial v'}{\partial t} + Lv + fu + \frac{u^2 tg\phi}{a} &= \frac{-g}{\rho_0 a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \int_z^0 \rho dz \right) + K \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ &+ A_M \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1-tg^2\phi)v}{a^2} + \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} \end{aligned}$$

$u'$  et  $v'$  diffèrent de  $u$  et  $v$  puisqu'on a négligé la partie de la force du gradient de pression qui dépend de la pression de surface. Pour déterminer  $\hat{u}$  et  $\hat{v}$  nous posons que :

$$(\hat{u}, \hat{v}) = (u' - \bar{u}', v' - \bar{v}')$$

Ainsi, dans la détermination de  $\hat{u}$  et  $\hat{v}$ , l'erreur due à l'élimination de la pression de surface dans  $u'$  et  $v'$  est sans conséquence puisque cette erreur est indépendante de  $z$  et est donc éliminée par soustraction de  $\bar{u}'$  et  $\bar{v}'$  [23].

### Conditions aux limites de la fonction de courant $\psi$ du transport

De façon générale, le domaine étudié est connexe. Ses limites sont fermées par les continents et il peut comporter plusieurs îles.

La valeur de  $\psi$  doit être spatialement constante le long de chaque ligne de côte de façon à ce que l'on ait une vitesse normale nulle. Sur le continent choisi,  $\psi$  doit être constante dans le temps également. Ceci traduit le fait que les bords de l'océan sont des lignes de courant, c'est-à-dire des lignes à travers lesquelles le flux d'eau est nul.

Mais sur les îles,  $\psi$  varie à cause des variations de la circulation des masses d'eau. Pour prédire les changements temporels de  $\psi$  la méthode de TAKANO [26] généralisée au cas des topographies variables du fond peut être utilisée [25]. Il est à noter que le fait que  $\psi$  soit spatialement constant le long des lignes de côte permet d'éliminer toute contribution due à la force de Coriolis.

Nous ne développerons pas ici les analogues aux différences finies de ces équations. La méthode aux différences finies de BRYAN [23] sera suivie.

BIBLIOGRAPHIE

- [ 1a] AIEA  
Objectives and design of environmental monitoring programmes for radioactive contaminants (Safety series n° 41) VIENNE, 131, 1975.
- [ 1b] AIEA  
Principes de limitation des rejets des matières radioactives dans l'environnement (Collection Sécurité n° 45), VIENNE, 67, 1981.
- [ 1c] AIEA  
Control of radioactive waste disposal into the marine environment Safety series (replacement for safety series n° 5 (1961), VIENNE, 192, 1982.
- [ 2] AEN  
Recommandations relatives aux procédures d'exécution des opérations d'immersion des déchets radioactifs en mer.  
PARIS, 15, 1979.
- [ 3] AEN  
Réévaluation de la validité du site d'immersion de déchets radioactifs dans la région Nord-Est de l'Atlantique.  
PARIS, 102, 1980.
- [ 4] AIEA  
*Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter.*  
INFCIRC/205, AIEA, 15, 1974.
- [ 5] OCDE-AEN  
7th International NEA/Seabed working group meeting.  
La Jolla, California, 221, March 15-19 1982.  
D. Richard ANDERSON, ed
- [ 6] SHEPHERD J.G.  
A simple model for the dispersion of radioactive wastes dumped on the deep sea bed.  
MAAF Fisheries Research, LOWESTOFF, Technical Report n° 29, 1976
- [ 7] OCDE-AEN  
NEA Task Group meetings of CRESP  
NEA Report LOWESTOFF, Avril 19-22 1982.
- [ 8] OCDE-AEN  
NEA Task Group meeting of CRESP  
NEA Draft Report LA SPEZIA, March 22-24 1983.
- [ 9] DEXTER S.C.  
On board corrosion analysis of a recover nuclear waste container, EPA Report, ORP/TAD-79/2, 1979.

- [10] OCDE-AEN  
Guide relatif aux conteneurs de déchets radioactifs destinés  
au rejet en mer.  
AEN, 32, 1979.
- [11] SMITTON C., HAIGHTON A.P.  
Nucl. and chem. Waste Management, 3 (3) 153-159, 1982.
- [12] HESPE E.D.  
Leach testing of immobilised radioactive waste solids, a proposal for a standard method.  
Atom. Energ. Rev. 9 (1), 195-207, 1971.
- [13] EWING M., THORNDIKE R.  
Suspended matter in deep ocean water.  
Science 147, 1291-1294, 1965.
- [14] DELOW C.E., CLARCK M.J.  
Remobilisation of radionuclides from marine sediments.  
Rapport DOE/RW/82.074, 1982.
- [15] ASTON S.R., FOWLER S.W.  
Experimental studies on the behaviour of long-lived radionuclides in relation to the deep sea disposal of nuclear wastes.  
Rapport IAEN-CN-43, SEATTLE 16-20 May 1983.
- [16] BACON M.P., ANDERSON R.F.  
Distribution of thorium isotopes between dissolved and particulate forms in the deep sea.  
J. Geophys. Res. 87 (C3), 2045-2056, 1982.
- [17] NOZAKI Y., MORIBE Y., TSUBOTA M.  
The water column distributions of thorium isotopes in the Western North Pacific.  
Earth Planet. Sci. Lett. 54, 203-216, 1981.
- [18] LAL D.  
Comments on some aspects of particulate transport in Ocean.  
Earth Planet. Sci. Lett. 49, 1980.
- [19] WORTHINGTON L.V.  
On the North Atlantic circulation.  
John Hopkins University Press, Baltimore M.D., 1976.
- [20] ARAKAWA A., KATAYAMA A. et MINTZ Y.  
Numerical simulation of the general circulation of the atmosphere.  
In : Proceedings of the WMO/IUGG. Symposium on Numerical Weather Prediction, TOKYO, 1968, IV.7 à IV.8-12.
- [21] MINTZ Y., KATAYAMA A. et ARAKAWA A.  
Numerical simulation of the seasonally and interannually varying tropospheric circulation.  
In : Climate impact assessment program, Survey conference proceeding, February 1972, A.E. Barrington ed, U.S. Dpt of Transportation, Cambridge, Mass. 194-216.

- [22] ARAKAWA A.  
Design of the UCLA general circulation model. In : Numerical Simulation of weather and climate. Department of Meteorology, UCLA, Technical report n° 7, 116, 1972.
- [23] BRYAN K.  
A numerical method for the study of the circulation of the world ocean.  
J. Comput. Phys., 4, 347-376, 1969.
- [24] HANEY R.L.  
A numerical study of the response of an idealized ocean to large-scale surface heat and momentum flux.  
J. Phys. Oceanogr. 4, 145-167, 1974.
- [25] SEMTNER A.J.  
An oceanic general circulation model with bottom topography. In : Numerical Simulation of Weather and climate. Department of Meteorology, UCLA, Technical report n° 90, 45, 1974.
- [26] TAKANO K.  
A general circulation model for the world ocean. In : Numerical Simulation of Weather and Climate. Department of Meteorology, UCLA, Technical report n° 8, 47, 1974.
- [27] MANABE S.  
Climate and the ocean circulation II. The atmospheric circulation and the effect of heat transfer by ocean currents. Month. Weather Rev., 97, 775-805, 1969.
- [28] BRYAN K.  
Climate and the ocean circulation III. The ocean model. Month. Weather Rev., 97, 806-827, 1969.
- [29] WETHERALD R.T. et MANABE S.  
Response of the joint ocean atmosphere model to the seasonal variation of the solar radiation. Month. Weather Rev., 100, 42-59, 1972.
- [30] BRYAN et COX M.D.  
A numerical investigation of the oceanic general circulation. Tellus, 19, 54-80, 1967.
- [31] BRYAN K et COX M.D.  
A nonlinear model of an ocean driven by wind and differential heating. Part I.  
J. Atmos. Sci., 25, 945-967, 1968.
- [32] BRYAN K. et COX M.D.  
A nonlinear model of an ocean driven by wind and differential heating. Part II.  
J. Atmos. Sci., 25, 968-978, 1968.
- [33] OCDE-AEN  
Programme de recherches et de surveillance du milieu lié à l'immersion de déchets radioactifs en mer.  
PARIS, 39, 1981.

- [34] GURBUTT P.A. et DICKSON R.R.  
Etat des connaissances océanographiques relatives au site  
d'immersion de déchets radioactifs de faible activité dans  
l'Atlantique Nord-Est.  
PARIS, 148, 1983.
- [35] S. SEKI, A. ITO, M. AMANO  
Integrity test of full size packages of cement-solidified radio-  
active wastes under deep-sea conditions.  
Nucl. and chem. Waste Management, 1, 129-138, 1980.



DISTRIBUTION

- TANGUY P.  
Directeur de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- JAMMET H.  
Directeur de la Protection/IPSN - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- LAFUMA J.  
IPSN/DPS - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- SOUSSELIER Y.  
IPSN - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- CAHUZAC O.  
IPSN/DPS - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- CHAPUIS A.M.  
IPSN/DPT - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- BELOT Y.  
IPSN/DERS/SERE - CEN/FAR  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-aux-ROSES
  
- GERMAIN P.  
DERS/SERE  
Laboratoire de Radioécologie Marine  
B.P. n° 270 - 50107 CHERBOURG
  
- RANCON D.  
DSN/DERS/SESTR - CEN/CADARACHE  
B.P. n° 1 - 13115 St PAUL-lez-DURANCE
  
- LAUBIER L.  
CNEXO-SIEGE  
66, Avenue d'Iéna - 75016 PARIS
  
- MADELAIN F.  
CNEXO-Océanographie Physique  
Centre Océanologique de Bretagne  
B.P. n° 337 - 29273 BREST

- SIBUET M.  
CNEEXO-Ecologie Abyssale  
Centre Océanologique de Bretagne  
B.P. n° 337 - 29273 BREST
  
- AUFFRET  
CNEEXO-Sédimentologie  
Centre Océanologique de Bretagne  
B.P. n° 337 - 29273 BREST
  
- HILL M.D.  
NRPB  
HARWELL DIDCOT - OXON OXII ORQ (ROYAUME-UNI)
  
- MARIETTA M.  
Sandia National Laboratories 5521  
P.O. Box 5800  
ALBUQUERQUE, NEW MEXICO 87185 (U.S.A.)
  
- DE MARSILY G.  
Centre Informatique Géologique  
Ecole des Mines de Paris  
36, rue St Honoré - 77305 FONTAINEBLEAU
  
- DELECLUSE P.  
Muséum National d'Histoire Naturelle  
Laboratoire d'Océanographie Physique  
43-45, rue Cuvier - 75231 PARIS CEDEX 05
  
- LE PROVOST C.  
Institut de Mécanique  
B.P. n° 53 - 38041 GRENOBLE CEDEX
  
- BLANC F.  
Centre Océanologique de Marseille  
Campus de Luminy  
U.R.A. n° 41, Case 901  
13288 MARSEILLE CEDEX 9
  
- DINET A.  
Campus de Luminy, Case 907  
Route Léon Lachamp  
13288 MARSEILLE CEDEX 9
  
- BIANCHI A.  
Microbiologie Marine  
Université de Provence  
Place V. Hugo - 13331 MARSEILLE