

Le congrès de Genève “L’atome pour la paix” (septembre 1958) et l’Hydrodynamique

The September 1958 “Atoms for Peace” Congress at Geneva and Hydrodynamics

PAR R. GIBRAT

PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS

DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA SOCIÉTÉ INDATOM

PRÉSIDENT DU COMITÉ TECHNIQUE DE LA S.H.F.

L'introduction de la physique nucléaire, puis de la technologie correspondante, permet d'étendre considérablement certains domaines de notre science, par exemple l'étude des mouvements des océans. Inversement, cette étude est fondamentale pour tous ceux qui voient dans les océans des possibilités d'évacuation des déchets radio-actifs ou qui se préoccupent des conséquences des sinistres maritimes portant sur des navires à propulsion nucléaire.

The advent of nuclear physics and nuclear engineering has made it possible to extend certain fields of our branch of knowledge such as the investigation of oceanic currents. Conversely, such investigations have become important for those who wish to dump radioactive waste in the sea or who are concerned with the results of accidents involving nuclear powered ships.

Quelques statistiques d'abord sur ce congrès, présidé par M. Francis Perrin, notre Haut-Commissaire à l'Energie Atomique :

69 nations y participèrent avec 2.700 délégués classés en officiels, conseillers et experts. De plus, 3.600 personnes de 46 nations reçurent une carte d'observateur — 911 représentants de presse furent accrédités — ils pouvaient ainsi assister aux séances, mais non y discuter. Au total donc, 6.300 assistants, ce qui classe ce congrès, de loin, en tête de tous les congrès scientifiques jamais tenus au monde. (Celui de Genève 1955 avait 4.000 assistants, dont 1.428 délégués officiels.) (1)

(1) La France avait, à elle seule, 5 délégués officiels, 35 conseillers, 250 experts et 800 observateurs.

Les U.S.A. avaient 450 délégués officiels, plus un secrétariat de plus de 100 personnes, 1.500 observateurs au moins; y compris leurs familles, il y avait plus de 4.000 Américains à Genève pendant la Conférence.

48 nations (2) présentèrent une ou plusieurs des 2.135 communications. De celles-ci, seulement 711 furent présentées oralement au cours de 230 heures de séances réparties en 77 sessions — 4 ou 5 pouvant être simultanées.

La France présenta 160 communications, dont 58 oralement.

(2) Voici, à titre de curiosité, la liste des pays qui ne présentèrent pas de communications : Bulgarie, Ceylan, Colombie, Equateur, Ghana, Guatémala, Indonésie, Iran, Islande, République Dominicaine, Salvador, et celle des pays qui en présentèrent : Argentine, Afrique du Sud, Allemagne Fédérale, Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Burma, Canada, Chili, Chine, Cuba, Danemark, Espagne, Etats-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Inde, Irak, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Philippines, Pologne, Portugal, République Arabe-Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Russie Blanche, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, Ukraine, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Vietnam, Yougoslavie.

Il a été possible, assez difficilement, pour les assistants, de se procurer un certain nombre de communications. Pour les avoir toutes, il faudra attendre le compte rendu de la Conférence, qui comprendra 32 volumes et un index, et coûtera près de 200.000 francs.

Deux expositions furent tenues en même temps : l'une gouvernementale et scientifique, l'autre commerciale et industrielle. La première fut dominée sans conteste par la fusion, où les U.S.A. présentaient en particulier une quinzaine de machines en vraie grandeur, certaines en fonctionnement; ils avaient déplacé la plupart de leurs spécialistes, accepté sûrement ainsi de retarder de plusieurs mois leurs travaux et dépensé pour cette seule exposition au moins 2 millions de dollars. Plus de 100.000 visiteurs furent dénombrés. Les Anglais (80 exposants — 1/3 de la surface) essayèrent de dominer la seconde, mais la France, à la surprise générale (100 exposants — 1/4 de la surface) et les U.S.A. comme on pouvait s'y attendre (53 exposants — 1/5 de la surface) leur tinrent largement tête.

Personnellement, j'ai été très assidu, assistant à 19 sessions, ce qui m'a permis de faire connaissance avec 150 rapports environ, soit 6 % du total; depuis, pour des raisons variées, j'en ai parcouru peut-être une centaine, ce qui m'amène-

ra à 12 % ou 13 %. Il me faut sûrement renoncer au reste, et tout le monde a dû faire sans doute comme moi.

J'ai pu rassembler 20 communications intéressant de près ou de loin la S.H.F., mais pour les raisons indiquées plus haut, ne peux avoir la prétention d'être complet. On trouvera la liste des communications en annexe à cet exposé; on notera, de plus, que chaque communication comporte une importante bibliographie, d'où au total près de 200 références. 16 d'entre elles proviennent de la session D 19 « Incidences sur le milieu d'une utilisation généralisée de l'énergie atomique » et, d'une manière plus précise, de la partie de cette session consacrée au « milieu marin », c'est-à-dire, en fait, surtout à l'utilisation des estuaires, des rivières et des océans pour l'évacuation des déchets radioactifs des centrales nucléaires. Les 4 autres traitent de l'utilisation des radio-isotopes, soit pour l'hydrologie souterraine (session D 6), soit pour l'étude du mouvement des sables dans l'eau de mer (session D 7).

Mon exposé comprendra donc trois parties de longueurs inégales : hydrologie souterraine, mouvement des sables et contamination du milieu marin.

A) HYDROLOGIE SOUTERRAINE (D 6)

Les deux premières communications correspondantes viennent d'Israël (P 1.613 et P 1.614), ce qui ne saurait étonner, étant donné l'importance vitale de ces problèmes pour cet Etat. La première cherche à définir, par des essais, les meilleurs traceurs radioactifs et les meilleures conditions de leur emploi étant donné le problème posé, à savoir, déterminer la vitesse du mouvement de l'eau ainsi que les principales caractéristiques hydrologiques du terrain aquifère pour le cas particulier des calcaires dolomitiques. Il s'agit exactement de la recharge de la rivière Yarkon et de l'étude des relations entre l'aquifère rechargée et la source correspondance située à 5 km de distance. De nombreux isotopes furent essayés : l'hexacyanate de cobalt 60 s'est montré le meilleur. La technique d'injection est par impulsion; le traceur est injecté dans un puits, suivi par un volume donné d'eau. Il est ensuite repompé du même puits après un temps donné durant lequel il a pu dériver dans la direction du gradient local. La courbe donnant la radioactivité pendant la récupération définit l'essai. Les conséquences

théoriques d'une telle technique sont discutées dans la deuxième communication : 4 modèles étant étudiés mathématiquement puis comparés aux résultats expérimentaux, leur examen permet le rappel de formules utiles.

a) MODÈLE SYNTHÉTIQUE.

On cherche à reconstruire, dans tous ses détails, la structure physique de l'aquifère, par des combinaisons de petites sphères et de capillaires. On cherche ensuite à déduire par l'analyse mathématique l'effet de l'aquifère sur la courbe de récupération. C'est en fait trop difficile, et ce modèle a été abandonné.

b) MÉTHODE PAR FONCTION DE TRANSFERT.

Si la forme de l'impulsion à l'emplacement de l'injection est $F_0(t)$ et à la distance a , $F_a(t)$, la transformée qui convertit F_0 en F_a est définie comme la fonction de transfert de l'aquifère. Cette méthode utilise la théorie générale de la

transformation de Laplace, si utilisée dans les servomécanismes par exemple. Le modèle suivant est un cas particulier de cette méthode.

c) MODÈLE STATISTIQUE.

On l'appelle ainsi, parce qu'il utilise les théories de la diffusion; les formules correspondantes sont immédiates et bien connues, en particulier des atomistes, car elles régissent la diffusion des neutrons. La concentration d'un traceur, à la distance vectorielle \bar{r} de l'origine, un temps t après une émission supposée instantanée sera, dans un liquide de vitesse vectorielle \bar{v} :

$$C(\bar{r}, t) = \frac{S}{(\sqrt{4\pi Dt})^3} e^{-(\bar{r}-\bar{v}t)^2/4Dt}$$

D coefficient de diffusion en hydrodynamique, contrairement à celui de la neutronique, dépend de la vitesse, par exemple en régime laminaire $2D=Bv$.

L'équation générale décrivant le comportement de la concentration C d'un traceur dans l'espace et dans le temps sera évidemment la suivante :

$$\frac{dC}{dt} = D_1 \nabla^2 C + D_2 (\bar{v}) \nabla C - \text{grad } C - \frac{\partial F}{\partial t} - \lambda C$$

∇ étant le laplacien habituel; le premier terme décrit la diffusion moléculaire; le deuxième, avec un coefficient D_2 dépendant de la vitesse, la dispersion hydrodynamique; le troisième, l'effet des courants de convection; le quatrième, l'effet des changements de phase du traceur (F étant sa concentration par unité de phase solide) et le

dernier terme la diminution avec le temps de la radioactivité du traceur.

d) MODÈLE TUBULAIRE.

Il est dû à notre ami Danel, de la SOGREAH, qui en a établi les formules principales; il représente la roche aquifère par un ensemble de tubes parallèles de différents diamètres. Les différences avec le modèle statistique sont très grandes et il est passionnant de les comparer tous deux avec les résultats expérimentaux, encore malheureusement rares.

Le tableau suivant donne des premiers résultats, que je laisse à interpréter. Nos journées de 1960 pourront utilement s'y essayer.

Caractéristiques	Modèle		Essais		
	Tubulaire	Statistique	Dolomite	Calcaire I	Calcaire II
Forme de la queue.	$t^{1/2}$	$t^{1/2} e^{-t}$	$< t^{1/2}$	$< t^{1/2}$	
t point/ t moyen.	0,5	0,95	0,65	0,82	0,91
c moyen/ c max.	0,25	0,98	0,35	0,84	0,98

Notons que le tritium (P 1.954), produit par les rayons cosmiques et la bombe à hydrogène (cette dernière se manifestant par une pointe dans la courbe donnant en fonction du temps la teneur en tritium des eaux de surface), fournit un marqueur remarquable pour l'étude des roches et des nappes aquifères.

B) MOUVEMENT DES SABLES

Deux communications, l'une du Portugal (P 1.820), l'autre des U.S.A. (Californie) (P 2.357), décrivent en détail les modalités d'expérience de traçage de sables; les deux utilisent le sable lui-même prélevé sur place; la première applique l'argent radioactif 110 sur la surface des grains par réduction du nitrate d'argent, ce qui permet d'en fixer 50 à 70 % de façon permanente, la deuxième envoie le sable à Oak Ridge pour irradiation (10^{12} neutrons/cm²/s pendant 14 jours), le principal isotope formé par irradiation du quartz étant le phosphore 32.

Ceci représente un gros progrès sur les précédentes études du même genre, qui utilisaient des particules étrangères ajoutées au sable des

verres par exemple, comme en France avec Hours et Romanovski). En effet, d'une part, le comportement des particules étrangères peut être différent de celui du sable, et d'autre part, leur niveau d'activité radioactive était fréquemment trop élevé pour la sécurité d'emploi sur des plages fréquentées telles que celles de Californie. La sensibilité s'est montrée excellente, pratiquement illimitée, car on peut extraire les radioisotopes des échantillons prélevés et les particules irradiées peuvent aussi être détectées pendant plusieurs mois après le début d'emploi. Je recommande vivement ces deux communications très détaillées aux spécialistes de ces questions.

C) CONTAMINATION DU MILIEU MARIN

Le problème des déchets radioactifs fait toujours l'objet de discussions passionnées (P 2.004). Pour les uns, il est d'importance négligeable; pour les autres, c'est le principal obstacle à l'utilisation de la fission. L'une et l'autre opinion sont, à mon avis, déraisonnables. Tout d'abord, il faut distinguer les déchets à basse radioactivité de ceux à haute radioactivité.

Pour les premiers, la méthode appliquée est de « diluer et disperser », dans l'air, dans le sol, dans les fleuves ou dans les estuaires, de telle façon que les concentrations atteintes soient dix ou cent fois plus faibles que les standards admis par les divers organismes de sécurité.

Pour les seconds, la seule solution est actuellement de les stocker (les U.S.A. ont déjà investi en réservoirs près de 35 milliards de francs). Pour l'avenir, de nombreux problèmes restent à résoudre. Pourra-t-on, plus tard, fixer la radioactivité sur les corps solides? Pourra-t-on les placer dans certaines formations géologiques, par exemple, dans des cavités préparées à l'avance dans des gisements de sel? Pourra-t-on les placer dans le fond des océans? Ici intervient l'étude passionnante des mouvements des grandes masses d'eau océaniques, et il est certain que l'océanographie va gagner beaucoup, dans les années à venir, en moyens et en méthodes, par suite des innombrables études que ce problème va engendrer. Une question, en apparence annexe, mais fort importante, naît de la propulsion nucléaire des navires, car, en cas de naufrage, que deviennent les produits de fission?

Traisons successivement des problèmes posés par les rejets en rivière, en estuaire et en mer.

a) REJETS EN RIVIÈRE :

Un rapport du Commissariat à l'Energie Atomique Français (P 1.175) expose d'abord les conditions de rejets à Saclay dans l'étang artificiel voisin, à Fontenay-aux-Roses dans les égouts et au Bouchet dans la rivière voisine; la dilution avant rejet doit être suffisante, il n'y a là rien à signaler pour les hydrauliciens. Le rejet à Marcoule dans le Rhône, par contre, a fait déjà l'objet d'expériences, par exemple sur le mode d'injection; ainsi les cônes de rejet sont inclinés à 45° par rapport à l'axe du fleuve par suite de l'existence, à cette profondeur, de courants secondaires également inclinés à 45°; le contrôle nécessaire de la dilution finale apprendra beaucoup sur le comportement du fleuve, sur les veines plus ou moins concentrées, que l'on pourra

faire éclater par un ouvrage approprié, les vitesses de sédimentation, etc.

Un rapport américain (P 393) traite des mêmes problèmes de décharges de l'énorme usine à plutonium de Hanford, dans la rivière Columbia. Il étudie avec grand soin l'accumulation des isotopes dans l'homme, soit en buvant l'eau provenant directement ou non de la rivière, soit en mangeant des produits de la terre arrosés par cette eau, ou des poissons pêchés dans cette eau ou des oiseaux aquatiques. Ce rapport, contrairement aux rapports français, ne fait mention d'aucune préoccupation concernant l'injection des déchets dans la rivière et les problèmes hydrauliques correspondants.

b) REJETS EN ESTUAIRE :

De nombreux réacteurs nucléaires seront sûrement placés dans un avenir proche au voisinage des côtes et plus précisément des estuaires. Des navires à propulsion nucléaire y pénétreront aussi. Normalement, les rejets seront à basse activité, mais un accident à un réacteur ou à un bateau peut entraîner un jour involontairement des rejets à haute activité. Il est donc capital de connaître le trajet probable, dans un estuaire, d'une injection de déchet en un point donné. Une communication américaine (P 1.835) rappelle la classification des estuaires, suivant la circulation des eaux salées, en quatre types principaux. Tous ceux qui projettent aujourd'hui des centrales nucléaires ont grand intérêt à le connaître.

Type A. — Le débit de la rivière domine celui de la marée (exemple le Mississippi). L'eau salée s'étend vers l'amont en formant un coin sous l'eau de la rivière, la surface de séparation eau salée/eau douce est nettement marquée, elle est très stable et ne permet pas d'échange notable.

Les trois autres *types B, C et D* correspondent à la prédominance du débit de la marée sur celui de la rivière et à l'existence d'un courant de marée alternatif.

Dans le *type B* (Chesapeake Bay), la turbulence est suffisante pour remplir l'interface par une région d'échange rapide de salinité, mais il reste à la partie supérieure une eau de salinité faible se dirigeant vers la mer.

Dans le *type C* (Roritan River, dans l'Etat du New Jersey), la turbulence est encore plus grande; il n'y a plus de gradient vertical de sa-

linité, mais un gradient latéral; dans l'hémisphère nord, le courant d'eau relativement douce est sur la rive droite.

Dans le *type D* (Delaware Bay), la turbulence due aux courants de marée est si grande que la salinité devient uniforme latéralement et verticalement. L'estuaire de la Rance, par exemple, est sûrement de ce type.

On devine tout de suite comment se fera, suivant les types et le point d'introduction, le mouvement d'un contaminant. Ainsi dans le type D, l'estuaire tout entier sera contaminé. Des essais sur modèle faits par les U.S.A. Corps of Engineers à Vicksbury avec du bleu de méthylène ont donné un excellent agrément avec des calculs mathématiques utilisant l'équation générale suivante définissant la concentration en fonction de l'espace et du temps :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \sum \frac{\partial}{\partial X_i} \left(K_i \frac{\partial c}{\partial X_i} - v_i c \right)_{i=1,2,3}$$

K_1, K_2, K_3 , définissant la turbulence et v_1, v_2, v_3 la vitesse de l'eau. Les deux modèles mathématiques et hydrauliques montrèrent que la concentration maximum du contaminant se déplace vers l'aval à une vitesse inférieure à la vitesse moyenne de l'eau.

Les deux communications anglaises (P 296 et P 297) exposent très complètement les essais faits le long des côtes, d'une part du Dorset devant le nouveau site nucléaire anglais de Winfrith Heath et d'autre part du Cumberland devant Windscale. Des études hydrographiques très soignées et très longues (5 années) ont montré, pour Windscale, que les effluents déchargés par tuyau à 3 km de la côte sont rapidement dilués avec de grands volumes d'eau de mer et ensuite soumis par la marée le long de la côte à un mouvement alternatif de quelques kilomètres. L'activité radioactive n'est enlevée de ce trajet que par la diffusion par turbulence, de telle façon qu'en quelques dizaines de kilomètres la concentration devienne négligeable. L'étude détaillée de la radioactivité absorbée dans les particules les plus fines de sables, de boue ou de matières organiques en suspension ou sur le fond a été faite mais, résultat essentiel, il semble que ce soit la radioactivité des algues comestibles qui, le long des côtes anglaises devant Windscale, détermine le maximum de décharges admissibles de produits de fission, soit 20.000 curies par mois avec l'espoir, écrivent les Anglais, de passer à 100.000. Le cas du Dorset a donné naissance depuis août 1956 à de considérables études hydrographiques (intensité et direction de courant de marée, dispersion de fluorescence, etc.) et conduisent à une limitation de la décharge à 25.000 curies par mois. On notera

cependant qu'un rapport américain (D 2.431) limite les décharges à quelques centaines de curies *par jour*, ce qui est plus faible. Les Anglais estiment cependant possible d'utiliser un petit canal comme modèle d'études avec comptage radioactif, sous réserve que le nombre de Reynolds soit suffisamment grand.

En conclusion, ils conseillent de reprendre chaque étude pour chaque cas particulier; la classification en quatre types rendait cela évident, *a priori*.

Avant de quitter les estuaires et côtes, donnons un instant aux problèmes s'élevant d'un accident à un navire à propulsion nucléaire : on a calculé (P 2.431) que, pour un réacteur de 50 MW (cargos rapide), non rechargé en éléments combustibles depuis un an et en marche 50 % du temps, 10 kg de matière fissile ont été brûlés, produisant 10^7 curies. Si le réacteur est coulé dans un port, par exemple de 15 km de long, 5 km de large, 15 m de profondeur et si les produits fissiles sont distribués uniformément, l'eau du port contiendrait 1/100 curie par m^3 , donnant une dose de radiation de 0,5 roentgen par jour à la surface. Mais surtout les supports des quais, les coques des navires et toutes les structures recouvertes d'organismes accumuleraient la radioactivité et il y aurait de très fortes concentrations locales dans l'eau. Si l'on réfléchit que le temps nécessaire en moyenne pour qu'une molécule de contaminant atteigne la mer varie d'un estuaire à l'autre ou à l'intérieur même d'un estuaire s'il est stratifié, de 1 à 200 jours, on comprendra toute l'importance des études hydrauliques pour déterminer si un port est mieux adapté qu'un autre à recevoir des navires à propulsion nucléaire.

c) Océans :

Les eaux des océans sont stratifiées (P 2.431). La couche supérieure, où les vents produisent un bon mélange, est peu épaisse (75 m en moyenne). On trouve une zone assez étroite, dite « thermocline », où rapidement la température décroît et la densité s'accroît lorsque la profondeur augmente. On distingue ensuite une couche intermédiaire et une couche profonde s'étendant jusqu'au fond; dans ces deux couches, la variation de température et de densité avec la profondeur sont lentes. Le gradient élevé de densité à la thermocline agit comme une barrière partielle entre la couche moyenne. On peut donc espérer que des matériaux radioactifs introduits en profondeur seront isolés de la couche supérieure pendant peut-être des centaines d'années. Dans l'océan Atlantique, les estimations pour l'eau en dessous de 2 km de profondeur varient de 50 à 1.000 ans. Pour l'océan Pacifique, on parle aussi de 1.000 ans. Pendant tout ce temps,

leur activité décroîtra, d'une part, et, d'autre part, il y aura dilution. L'enjeu est de taille, car si l'énergie nucléaire remplace peu à peu les autres sources d'énergie, il faut compter sur un ordre de grandeur de 1.000 tonnes de produits de fission par an et on a vu ce que produirait dans un port immobile et isolé un bateau en un seul accident. Craig a calculé qu'avec 300 ans de résidence moyenne dans la couche profonde et un parfait mélange, 1.000 tonnes de produits de fission par an ayant subi l'habituelle attente de 100 jours « cooling » conduiraient à une activité radioactive dans la couche superficielle des mers seulement égale à l'activité naturelle actuelle. La concentration supplémentaire en strontium 90 dans le corps humain, compte tenu de la concentration de la teneur dans les océans, à travers les os et la peau des poissons, n'atteindrait que 5 % de celle admise par les standards actuels.

Les Russes (P 2.508) ne partagent pas cet espoir et, dans une communication à Genève, ils ont exposé les résultats recueillis par leur bateau océanographique « Vityoz » en 1957-1958 pour 12 des 15 fosses recensées dans le Pacifique. (Il y en a 3 dans l'Atlantique et 1 dans l'Océan Indien.) Leur raisonnement porte surtout sur la fosse des Tonga (profondeur maximum 10.816 m.)

A leur avis, l'analyse de la configuration de la tranchée, les conditions hydrologiques et hydrochimiques, le caractère des sédiments, l'existence de la vie aux plus grandes profondeurs et la circulation de l'eau montrent que le mélange des eaux dans la fosse est rapide. En conséquence (je les cite) : « l'immersion de matériaux radioactifs dans les fosses océaniques constituerait un danger réel dans un avenir très proche ».

Les Américains n'en continuent pas moins leurs études et, si le but recherché n'est pas atteint, l'océanographie y gagnera sûrement beaucoup. Naturellement, il ne faut pas étudier seulement les mouvements horizontaux ou verticaux des eaux, mais aussi l'effet des sédimentations par accumulation de radioactivité dans des organismes morts et tombant peu à peu vers le fond; certains radio-éléments tendent à prendre la phase solide. Inversement, il y a continue-

ment des échanges biologiques entre couches, qui peuvent amener plus rapidement l'activité radioactive à la surface. Tout ceci fait comprendre l'extrême difficulté de ces problèmes et leur reconnaissance officielle dans le droit de la mer, tel qu'il fut approuvé par les 86 nations siégeant en mars et avril 1958 à Genève.

Je dirai pour terminer quelques mots sur les méthodes nouvelles, basées sur la radioactivité elle-même, qui ont servi et serviront encore plus dans l'avenir à l'étude des mouvements des océans et en particulier de l'échange entre couches. Ainsi, pour déterminer l'âge des eaux, l'utilisation du C^{14} radioactif (demi-vie 5.600 ans) (P 1.979 et P 2.128) et celle du Thorium 232 et de l'Uranium 235 ou 238 (durée de vie: 10^9 à $5 \cdot 10^{10}$ années) (P 1.980), ont donné à nouveau naissance à Genève à des travaux importants. Il est intéressant de noter, par exemple, qu'en décembre 1957, on a constaté un accroissement de 9 à 10,5 % de l'activité spécifique de C^{14} dans l'eau de surface de l'océan (autour de la Nouvelle Zélande). Au même endroit, depuis fin 1954, l'atmosphère marquait une augmentation exponentielle de cette activité, atteignant en décembre 1957, $9,30 \pm 0,3$ %. Seule explication possible, production de C^{14} par explosions atomiques et durée d'échange de trois années entre l'atmosphère et l'eau en surface. Il y a là renversement complet de la tendance à la diminution de 4 % par siècle due au CO_2 du foyer domestique ne contenant pas de C^{14} .

Les profils d'activité de C^{14} suivant la profondeur dans divers océans indiquent un « âge C^{14} » beaucoup plus grand pour les eaux du Pacifique Sud et de l'Antarctique que pour l'Atlantique. Le Beryllium 10 (demi-vie $2,5 \cdot 10^6$ an) produit par les rayons cosmiques (P 412), ainsi que les retombées de matériaux radioactifs provenant des essais de bombes atomiques (P 403), ont été aussi utilisés pour des études océaniques.

En conclusion, le Congrès de Genève en 1958, après celui de 1955, a mis l'accent sur des problèmes nouveaux et des méthodes nouvelles. L'Hydrologie souterraine et l'Océanographie en recevront une impulsion indiscutable.

ANNEXE

N°	PAYS	TITRE	Articles ou ouvrages cités (nombre)	N°	PAYS	TITRE	Articles ou ouvrages cités (nombre)
		SESSION D-6. — Production des isotopes et usages dans la recherche.					
P/1.613	Israël	Use of radioisotopes in studies of groundwater flow. I. — Laboratory and field experiments on the suitability of various tracers. 9 p. HALEVY (E.) et NIR (A.) et al.	14	P/411	U.S.A.	Trace elements and transport rates in the ocean. 7 p. ARNOLD (J. R.).	7
P/1.614	Israël	Use of radioisotopes in studies of groundwater flow. II. — On the characteristics of tracers pulse shape. 9 p. HALEVY (E.) et NIR (A.).	9	P/412	U.S.A.	Be geochemistry and Be 10 age determination. 8 p. MERRILL (J. R.), HONDAM, ARNOLD (J. R.).	13
P/1.820	Portugal	Tracing sand movement under sea water with radioactive silver, Ag 110. 10 p. GIBERT (A.), ABEGASIS (F.) et al.	7	P/1.175	France	Problème du rejet des résidus radioactifs liquides au CEA. Traitements aboutissant à des rejets en rivière. 13 p. DUHAMEL, MENOUX, CANDILLON.	10
P/2.357	U.S.A.	Experiments with radioactive sand as a tracer of leach sand movement. 14 p. INMAN (D. L.) et CHAMBERLAIN (T. K.).	7	P/1.835	U.S.A.	Factors affecting the dispersal of fission product in estuarine and inshore environments. 10 p. PRITCHARD.	13
		SESSION D-19. — Incidence sur le milieu d'une utilisation généralisée de l'énergie atomique.		P/1.954	All.	Groundwater studies by using tritium as a tracer. 27 p. BUTTLAR, WENDT.	12
P/296	U.K.	Sea disposal of low activity effluent. 30 p. BOWLES (P.) et al.	—	P/1.979	U.S.A.	A critical evaluation of radio-carbon techniques for determining mixing rates in the oceans and the atmosphere. 14 p. CRAIG.	9
P/297	U.K.	The disposal of radioactive liquid wastes into coastal waters. 11 p. DUNSTER (H. T.).	—	P/1.980	U.S.A.	Ionium—thorium and lead isotope ratios as indicators of oceanic water masses. 5 p. GOLDBERG, PATTERSON, CHOW.	7
P/393	U.S.A.	Radioactive materials in aquatic and terrestrial organism exposed to reactor effluent water. 13 p. DAVIS (J. J.), et al.	6	P/2.004	U.S.A.	The role of waste management in the development of the nuclear energy industry. 7 p. LIEBERMAN.	—
P/402	U.S.A.	Biological factors determining the distribution of radioisotopes in the sea. 11 p. KETCHUM (B. H.) et BOWEN (V. T.).	18	P/2.058	U.R.S.S.	Concerning the possibility of disposing of radioactive waste in ocean trenches. BOGOROV, KREPS.	9
P/403	U.S.A.	Marine geochemical studies with fallout radioisotopes. BOWEN et SUGIHARA.	20	P/2.128	New-Zel.	Atmospheric radiocarbon as a tracer in geophysical circulation problems. 20 p. RAETER (T. A.), FERGUSON (G. J.).	12
				P/2.431	U.S.A.	Oceanic research needed for safe disposal of radioactive wastes at sea. REVELLE (R.) et SCHAEFER (M. B.).	22

DISCUSSION

Président : M. BARRILLON

M. AILLERET demande s'il n'y a pas de difficultés pour chiffrer l'âge de l'eau des grandes profondeurs par le Carbone 14?

D'une part l'acide carbonique diffuse dans l'eau de sorte qu'il n'est pas certain *a priori* que l'âge de l'acide carbonique dissous soit l'âge de l'eau où il se trouve actuellement.

D'autre part, des masses très importantes d'acide carbonique sont contenues dans le carbonate neutre et dans le carbonate acide de calcium qui existent dans les mers, au point qu'il est, je crois, classique d'admettre que l'équilibre entre les deux carbonates et l'acide carbonique est le régulateur principal qui explique la constance de la teneur en CO₂ de l'atmosphère terrestre.

S'il en est ainsi, les atomes de carbone du CO₂ que l'on trouve dans les prélèvements d'eau peuvent avoir été incorporés longtemps à un carbonate et par suite la date depuis laquelle ils ont été soustraits à l'action des rayons cosmiques dans la haute atmosphère ne caractérise plus l'âge de l'eau, ou tout au moins n'en donne plus qu'une limite supérieure.

M. GIBRAT indique, d'une façon à peu près certaine, qu'il n'y a pas de réponse à cette question dans les communications dont il vient de rendre compte, mais que l'on trouverait au Commissariat de l'Energie Atomique quelqu'un parmi les spécialistes qui pourrait y répondre : il indique, toutefois, que comme l'on procède à cette détermination par profils, peut-être est-il admis implicitement que les variations le long d'un profil sont indépendantes des causes d'erreur signalées par M. AILLERET.

M. CASTANY signale que la détermination de l'âge de l'eau par le carbone est essentiellement utilisée sur des charbons ou bois.

En ce qui concerne les traceurs radioactifs, M. VALEMBOS signale l'intérêt croissant suscité par leur utilisation pour l'étude des transports de sédiments par la mer ou les rivières. Le Laboratoire National d'Hydraulique s'y est intéressé dès le début et a déjà une assez grande expérience de ces méthodes. En ce qui concerne le procédé à utiliser, le Laboratoire de Chatou reste à l'emploi des traceurs fondus dans du verre, qui semble préférable à bien des points de vue aux procédés portugais ou californiens.

Sur sa demande, M. JAFFRY, qui, au Laboratoire National d'Hydraulique est le spécialiste de ces questions, donne les raisons de cette préférence :

Les méthodes d'utilisation des traceurs radioactifs dans les études de mouvements de sédiments doivent répondre à un certain nombre de qualités concernant, les unes la fidélité et la précision des observations et mesures, les autres les facilités d'emploi de la méthode considérée ou bien encore les conditions de sécurité. Il est évident qu'aucune des techniques employées jusqu'ici ne répond de façon parfaite à toutes ces qualités et que les utilisateurs ont dû tenir compte, dans la conception et la mise au point de leurs méthodes, de leurs possibilités matérielles et financières, ainsi que des données particulières des problèmes qui pouvaient leur être posés.

Le marquage radioactif du sédiment naturel, préconisé par les ingénieurs portugais et américains, permet d'obtenir des traceurs ayant le même comportement physique, sous l'action des agents hydrauliques, que le sédiment naturel que l'on désire suivre et constitue à cet égard la solution idéale.

De tels traceurs présentent toutefois quelques inconvénients :

1. Le marquage par dépôt d'Argent 110 radioactif à la surface des grains, utilisé au Portugal, ne permet pas de garantir que les variations de la radioactivité décelées au cours des détectations, sont dues essentiellement à la dispersion des grains du traceur et à la décroissance radioactive spécifique de l'élément marqueur, à l'exclusion de toute perte d'activité par abrasion ou sous l'action chimique de l'eau de mer. Les ingénieurs portugais signalent d'ailleurs qu'après le marquage on observe une perte brutale de 30 % de l'activité initiale, à la suite d'un brassage des grains marqués dans une cuve à houle.

2. L'irradiation directe du sédiment naturel, pratiquée aux Etats-Unis, ne donne un rayonnement utilisable que si le sédiment contient, sous forme d'impuretés, les éléments convenables, soit, dans le cas présent, du phosphore donnant, par irradiation aux neutrons lents, du phosphore 32, émetteur β de haute énergie.

L'emploi d'un émetteur β ne permet pas de pratiquer la détection du traceur *in situ*, le rayonnement étant absorbé par quelques centimètres d'eau. Il faut donc effectuer de nombreux prélèvements d'échantillons suivis de mesures d'activité en laboratoire. Il n'est pas toujours possible, dans ce cas, de procéder, à chaque expérience, à une exploration complète de la zone d'étude, les mouvements de sédiments marins se produisant le plus souvent pendant la mauvaise saison, au cours de tempêtes qui peuvent se succéder à intervalles très réduits.

De plus, la période de décroissance du phosphore 32 (14,3 jours) semble un peu faible pour couvrir utilement des mouvements de sédiments se produisant sur une durée de plus d'un mois.

Par contre, si les traceurs constitués par un radioélément fondu dans du verre ne donnent pas une image absolument exacte du sédiment naturel, bien qu'il soit possible d'ajuster avec une grande précision la granulométrie et la densité du verre à celles du sable naturel et que l'influence de la forme des grains ne semble intervenir qu'au second ordre, si l'on élimine les particules écailleuses, ils présentent un certain nombre d'avantages, en particulier par leurs commodités d'emploi :

— Le choix de l'élément radioactif, et, par conséquent, celui du type de rayonnement, de son énergie et de sa période est beaucoup moins limité, la fusion de l'élément choisi dans le verre ne posant un problème de chimie du verre, résolu jusqu'ici par les fabricants pour le chrome 51 (γ , T = 28 jours), l'iridium 192 (γ , T = 74 jours), le scandium 46 (γ , T = 85 jours), le tantale 182 (γ , T = 111 jours) et le zinc 65 (γ , T = 250 jours).

-- Les mêmes valeurs d'activité peuvent être concentrées dans des quantités de traceurs plus réduites, la diminution du nombre de grains actifs mis en œuvre étant compensée par l'emploi de sondes détectrices de large emprise. Ceci permet de limiter à des dimensions et des poids raisonnables les dispositifs de manipulation et de protection utilisés lors des opérations d'immersion du traceur et constitue un avantage appréciable si l'on songe aux conditions souvent très dures des travaux à la mer.

M. GIBRAT pense que les deux méthodes trouveront leur champ d'application particulier; l'intérêt est apparu de la possibilité de suivre les sables pendant plusieurs

mois, c'est-à-dire bien plus longtemps que le permettraient les autres émetteurs du fait de la possibilité de disparition de leur radioactivité. Cependant, il faut observer que les défenseurs de l'utilisation des verres ont été forfaits à Genève. M. GIBRAT n'avait pas l'intention de prendre une position quelconque sur la question: il a simplement essayé de donner une vue d'ensemble.

M. le Président pense qu'il y aura lieu de faire d'ici six mois une réunion spéciale sur la question des traceurs. Il remercie M. GIBRAT de tous les renseignements qu'il a donnés et le félicite de les avoir présentés en si peu de temps et d'une façon aussi claire.

