

G. COURTOIS \*

## LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE ET LES TRACEURS RADIOACTIFS POINT DE LA SITUATION EN FRANCE

### Introduction. Avertissement

Le présent article ne constitue pas à proprement parler une introduction à l'emploi de traceurs radioactifs en dynamique sédimentaire. Cette technique a maintenant une quinzaine d'années et nous ne saurions éviter un certain nombre de lieux communs en voulant la présenter de nouveau.

Aux lecteurs qui rechercheraient une introduction à ces procédés, nous recommandons en premier, la lecture des deux articles généraux et bibliographiques suivants, qui ont comme caractéristiques d'être relativement récents et de se bien compléter l'un l'autre :

- l'un de Courtois, datant de 1967, qui se base surtout sur un aspect technologique et méthodologique [1];
- l'autre, de Romanovsky du C.R.E.O., de 1968, comportant 113 analyses de références bibliographiques, ainsi que la présentation succincte de toutes les expériences connues dans le monde et enfin d'intéressantes analyses économiques du problème [2].

Au contraire, nous avons voulu ici montrer l'évolution technique de cette méthode en présentant, avec exemples à l'appui, les points les plus intéressants, soit qu'ils se présentent comme des nouveautés dans la méthodologie ou l'interprétation des résultats, soit qu'ils constituent des sujets à discussions et soulèvent des questions controversées.

La majeure partie de ces points seront évoqués dans cet article général, mais nous avons tenu à développer à part dans des annexes techniques distinctes, trois sujets particulièrement marquants par leur nouveauté et leur importance; il s'agit :

1. De la détermination de la masse minimale de traceurs à injecter;
2. Du problème général de la représentativité d'un nuage de traceurs;
3. De la discordance entre certains résultats obtenus d'une part par traceurs radioactifs, d'autre part, par l'emploi de la formule de Meyer-Peter.

Du point de vue méthodologie, l'étude de dynamique sédimentaire par traceurs radioactifs est très simple : dans la zone à étudier, en des points et suivant des formes judicieusement choisis, on immerge un sédiment marqué, aux caractéristiques aussi voisines que possible du sédiment réel, et on détermine dans le temps le déplacement de cette masse immergée, déplacement détecté par le transport de radioactivité.

Entre juin 1954 et mars 1955, sans aucune concertation mais selon des procédés très voisins, les trois premières expériences furent effectuées par le Japon, la Grande-Bretagne et la France, suivis de près par plusieurs autres pays. Actuellement, nous relevons des expériences dans vingt-sept pays différents, la France venant en tête quant au nombre d'expériences, quant à la qualité aussi peut-on espérer.

### Les utilisations de la méthode

Avant de regarder la technologie de la méthode et le dépouillement des résultats, il est bon de faire un tour d'horizon des problèmes qui peuvent trouver une solution partielle ou totale par l'emploi de cette méthode. Ils sont essentiellement de deux types :

- les problèmes liés au génie civil, fluvial ou maritime;
- les problèmes liés à la recherche fondamentale et appliquée.

\* Commissariat à l'Energie Atomique, Chef des Laboratoires de la Section d'Application des Radioéléments de Saclay (S.A.R.).

## G. COURTOIS

### Les problèmes liés au génie civil.

Ce premier groupe est de loin le plus important; c'est celui qui exige la plus grande mise en œuvre, mais qui donne également les résultats les plus spectaculaires et les plus heureux. Dans ce groupe, les domaines d'applications les plus fréquents sont :

#### LES OPÉRATIONS D'ÉTUDES D'EFFICACITÉ DE DRAGAGE.

Le tonnage croissant des navires, plus particulièrement des pétroliers, pose le problème crucial des accès et par suite du dragage. Le rejet des masses draguées doit se faire de telle sorte que sans trop s'éloigner du lieu de dragage, ce qui augmente considérablement le prix de revient, on puisse être assuré que le sédiment ainsi rejeté ne retourne pas au chenal dragué et n'est pas recyclé.

Les études par traceurs radioactifs consistent alors, soit :  
— à étudier le mouvement général des sédiments sur la zone de rejet choisi;  
— à marquer la masse draguée dans la drague ou la canalisation de rejet elle-même et à suivre l'évolution de cette masse.

L'expérience qui a eu lieu dans le golfe de Fos (participants : Port autonome de Marseille, L.C.H.F., S.A.R.) fait partie de cette deuxième catégorie, une masse de traceurs ayant été injectée dans un chaland qui la déverse sur le point d'immersion : on étudie alors la formation du courant de densité, son dépôt sur le fond et la reprise des sédiments déposés sous les actions hydrométéorologiques locales (courants, houles, vents).

Signalons que la prochaine expérience menée par le L.N.H. au voisinage de la passe de l'Ouest de la Gironde, fait partie de la première.

#### LES OPÉRATIONS DE PROTECTION DES CÔTES ET D'ENTRÉE DE CHENAUX D'ACCÈS (BARRES).

L'érosion d'une côte, la destruction progressive ou l'enfoncement excessif d'une digue naturelle ou artificielle, la formation trop fréquente à l'embouchure d'un fleuve navigable de bancs et barres perturbatrices en gênant l'accès sont des phénomènes graves que l'on doit pallier par la mise en place d'ouvrages de protection ou de stabilisation (épis, panneaux de fond, etc.).

Le projet même de protection nécessite la connaissance exacte du mal, de sa nature, de son origine, et son estimation quantitative, connaissance à laquelle la technique présentée peut contribuer.

En France, dans ce domaine et dans les cinq dernières années, citons deux expériences menées avec le L.C.H.F. :  
— l'une sur l'estimation du débit de galets de la côte de la pointe du Hourdel (Somme) [3];  
— l'une sur le transport côtier de la côte du Cap-Ferret au nord de la baie d'Arcachon [4].

#### TARAGE DES MODÈLES RÉDUITS.

De nombreux avant-projets de travaux d'aménagement débouchent sur la construction de modèles réduits à fond mobile. Dans de tels modèles, le tarage consiste à contrôler la bonne similitude entre les mouvements de fond existants sur le modèle réduit, et les mouvements réels. Les traceurs radioactifs interviennent dans la phase expérimentale qui permet de recueillir le maximum d'informations sur les mouvements réels.

Ce type d'applications a été surtout développé par le L.N.H. de Chatou où il a fait l'objet d'à peu près une expérience sur deux menées par ce laboratoire.

#### Exemples :

- déplacement de galets dans le Rhône : Pierre-Bénite et Vallabrègues [5];
- études sur le Niger, l'Oubangui [6, 7];
- mouvements en Loire, à Ancenis et Beaugency [8, 9]; toutes expériences menées sous la gouverne du L.N.H.

#### LES ÉTUDES SYSTÉMATIQUES DE SITES IMPORTANTS.

Dans certains cas, toute une région est le cadre d'aménagements extrêmement importants; pour de tels projets, une masse considérable de renseignements doit être accumulée dans tous les domaines concernant les transports en suspension et le charriage, les traceurs radioactifs s'avérant un des moyens de les obtenir.

En Europe, hors France, nous pourrions citer deux cas particulièrement marquants :

- le complexe portuaire d'Europoort, permettant aux superpétroliers de remonter jusqu'à Rotterdam, a fait l'objet, dans le cadre du Projet Delta, de plusieurs dizaines d'immersions ayant abouti, en mer, à l'obtention de résultats quantitatifs [10];
- la mise en valeur industrielle et maritime de l'embouchure de l'Elbe en Allemagne Fédérale, qui a fait et continue à faire l'objet de nombreuses expériences par traceurs radioactifs [11].

En France, se rattachent à ce type :

a) *L'étude du nouvel avant-port de Dunkerque*, expériences menées par le L.N.H. avec notre concours, comportant trois phases :

- une étude préliminaire en courte période en 1966;
- une étude plus complète avec cinq immersions en longue période en 1967 [12];
- une étude de reproduction des résultats sur modèle réduit à fond mobile, prévue pour l'année en cours.

b) *Les études pour aménagements du golfe de Fos*, dépendant du Port autonome de Marseille et qui ont fait l'objet :

- de plusieurs lots d'immersion sur le Theys de la Gracieuse (L.N.H.) [13];
- de l'expérience de rejet de drague, déjà citée.

c) *Les études des aménagements des chenaux d'accès en Gironde* qui ont fait l'objet de trois ou quatre études différentes dont des relevés de turbidité par radioactivité naturelle, dont on trouve la description et les résultats dans un article de Martin [14].

#### APPLICATIONS DIVERSES (notamment dans le domaine d'hydraulique fluviale).

— La mesure de l'apport solide d'une rivière dans un réservoir naturel ou artificiel, soit que ce site existe déjà (apport du Stung-Sen dans le Grand Lac, Cambodge 1963 [15]), soit que celui-ci existe en puissance (prévisions pour l'établissement de barrage : apport de la Doller dans les Vosges, Génie rural de Mulhouse [16], et, en cours d'expérience, de la Tet et de la Lentilla pour le barrage de Vinca, Génie rural de Perpignan).

— Etude de l'efficacité de mise en place de moyens de stabilisation de rivière navigable.

— Etude de l'orientation des prises d'eaux de centrales hydro-électriques ou atomiques.

- Débit quantitatif de rivières, etc.

Cette liste n'est nullement exhaustive, mais permet, par un tableau certes incomplet et très rapidement brossé, de donner un bon aperçu des vastes possibilités d'emploi des traceurs radioactifs dans le domaine lié au Génie civil.

#### Les problèmes liés à la recherche fondamentale et appliquée.

Il est assez encourageant de voir qu'un certain nombre de chercheurs, d'universitaires, ont été amenés à essayer la méthode et à l'adopter, ayant eu la démonstration, appareils en mains, que l'utilisation des traceurs radioactifs est un outil

- qui peut leur rendre service,
- qui est à leur portée.

En gros, les recherches menées dans cette direction, ont pris deux voies différentes :

1) *L'utilisation de traceurs radioactifs sur un site judicieusement choisi*, non pas en vue uniquement de connaître la dynamique locale, mais de *parfaire la méthodologie et surtout de mettre au point des procédés nouveaux généralisables*.

Se rattachent à ce groupe les analyses dans le Rhône par M. Ramette du L.H.N. permettant de trouver les paramètres reliant, en régime d'hydraulique fluviale, la force tractrice critique  $\tau_0$  et le diamètre de l'entité sédimentaire à transporter [5].

On annexera volontiers à ce groupe, l'ensemble des quelques six ou huit expériences menées le long du littoral roussillonnais, avec l'équipe du Centre de recherches de sédimentologie maritime de Perpignan, qui, notamment avec M. Monaco, nous ont permis de mettre au point une méthodologie permettant d'obtenir des débits de charriage en mer [17, 18].

2) *Les utilisations de traceurs radioactifs en vue d'étudier la dynamique locale* a fait l'objet d'expériences épisodiques jusqu'en 1965, et a pris un essor nouveau depuis cette date.

Il serait long et fastidieux d'énumérer les travaux qui ont été faits avec différents centres de recherches depuis quelques années (une vingtaine d'expériences en quatre ans). Nous encouragerons simplement les chercheurs à faire preuve d'imagination et à chercher quelles sont les expériences qui pourraient leur être utiles dans différents domaines, notamment en géomorphologie, où l'ensemencement de petites quantités de traceurs en des endroits bien précis, suivant des conditions choisies et imposées par les spécialistes, peut s'avérer un outil très précieux.

Dans un tel domaine, tout ne peut être réussite totale, surtout quand le problème est difficile (on peut penser notamment au débit de charriage de la Loire en crue, problème que nous avons tenté d'aborder récemment avec le professeur Berthois), mais beaucoup peut être essayé, et chaque expérience n'est jamais un échec total.

### Méthodologie

Sur cet aspect méthodologique, nous désirons être assez bref et n'engager les idées que sur quelques points particuliers très précis, soit se présentant comme des nouveautés, soit pouvant faire l'objet de discussions particulières, ceci pour permettre de consacrer plus de place à l'interprétation et au dépouillement des résultats.

La méthodologie passe par les points suivants :

- 1) *Choix et fabrication du traceur*.
- 2) *Choix de la masse de traceur à immerger*. Représentativité du nuage de traceur.
- 3) *Immersion* — appareillage d'immersion et condition d'immersion.
- 4) *Détection* — appareillage de détection et méthodologie de détection.
- 5) *Relevés des conditions hydrologiques et météorologiques*.

1) *Le choix et la fabrication du traceur*, est un point important qui fait l'objet d'une communication particulière, dans laquelle sera posé le problème de la représentativité du sédiment marqué, notamment en ce qui concerne les sédiments péliques. Sur ce problème, le lecteur se reportera à l'article de M. Caillot.

2) *Choix de la masse de traceur à immerger*.

Notre position sur ce point est qu'il faut immerger la masse *minimale* de traceur compatible, soit avec les impératifs de technologie (cas de la vase), soit avec la mise en cause de la représentativité du résultat obtenu (cas des sables).

*Pourquoi minimale ?* Pour deux raisons :

1° Pour des raisons de facilité de manipulation et de protection suffisamment évidentes pour que l'on n'insiste pas plus;

2° Parce que dans notre idée, mais il y a peut-être ici lieu à discussion, une faible masse s'incorpore plus facilement à la masse générale en mouvement et la représentativité traduite par le bon mélange est vraisemblablement plus vite atteinte.

En effet, en dehors de la très rare possibilité d'enfouir le traceur sur une certaine épaisseur, qui ne s'offre que sur les bancs découvrants, l'idéal, à nos yeux, serait de répartir le traceur sur une couche d'épaisseur aussi faible que possible, monograin à la limite, de façon à ne pas créer une surépaisseur qui tende à modifier localement les forces existantes sur le fond et à faire prendre en charge une partie de la masse active déposée aux dépens de grains inactifs immobiles ou peu déplacés.

*Dès lors, masse minimale :*

— *dans le cas des vases*, le nombre d'entités marquées est toujours très élevé et ne pose pas le problème de leur statistique. Par contre, afin de conserver aux vases leurs propriétés dynamiques, la masse de traceur fixé doit être inférieure à une masse donnée, de l'ordre de quelques centaines de mg par kilo, ce qui a pour conséquence une masse *minimale* de vase pour obtenir une activité donnée. Cette masse est située, en général, autour de 100 g à 2 kg équivalent sec.

— *dans le cas des sables* [19], la masse minimale de traceur est imposée par la statistique du nombre de grains vus par la sonde. C'est un problème très complexe et controversé qui n'a jamais été étudié à notre connaissance.

Aussi, nous proposons nous, dans l'annexe 1 à cet article, de donner une base d'étude de cette question, et d'aboutir à des formules qui permettent de calculer la masse de traceur à immerger dans une série de conditions que nous espérons les plus générales possibles.

Avant de quitter ce sujet, il est bon de rappeler ici un des faits essentiels de l'analyse qui apparaîtra dans cette annexe.

## G. COURTOIS

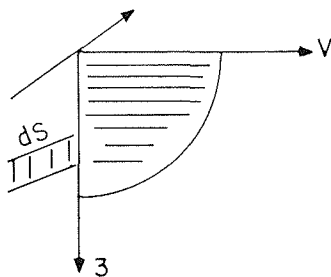
Si la masse minimale de traceur à immerger est de 1 kg (ordre de grandeur très courant) pour une détection en dynamique c'est-à-dire quand un traineau est tracté sur le fond, elle devra être de 10 kg pour une détection en statique point par point, et de 100 kg si on désire effectuer des carottages et retrouver un nombre représentatif de grains marqués dans celle-ci.

*Ainsi donc, la prise de carottes coûte cher en masse de traceur à immerger.*

Mais ce traceur une fois immergé n'est pas pour cela immédiatement représentatif : les conditions connues sous le nom de conditions de bon mélange doivent être satisfaites. De plus, et ceci est un fait nouveau, en supposant ces conditions de bon mélange satisfaites, paradoxalement *les paramètres qui régissent la dynamique du nuage en mouvement et de la masse générale des sédiments transportés sont différents.*

Ainsi, la vitesse du centre de gravité du nuage  $V_G$ , supposé représentatif, n'est pas égale à la vitesse débitante  $V_m$  [paradoxe de Courtois et Sauzay].

On peut en donner un aperçu de la manière suivante, en prenant le cas d'un écoulement laminaire, c'est-à-dire d'un courant à gradient de vitesse :



Les conditions de bon mélange s'expriment par :

$$\frac{dA}{A} = \frac{dQ}{Q} = \frac{VdS}{Q}$$

qui s'expriment en disant que la masse (ou l'activité) de traceur  $dA$  passant à travers un tube de courant  $dS$  de débit  $dQ$  est proportionnel à ce débit  $dQ$ .

La vitesse du centre de gravité  $V_G$  d'un tel nuage est donnée par :

$$V_G = \frac{\int V dA}{\int dA} = \frac{\int V A/Q \cdot V dS}{A} = \frac{\int \bar{V}^2 dS}{Q} = S V_m$$

La vitesse débitante :

$$V_m = Q/S$$

et :

$$V_G = \bar{V}^2 / V_m$$

ou encore :

$$V_G = \lambda V_m$$

avec  $\lambda = [\bar{V}^2 / (V_m)^2]$

$V_G$  et  $V_m$  sont différents,  $\lambda$  étant pour un écoulement quelconque généralement différent de l'unité.

Cette démonstration élémentaire en tube de courant est généralisable à un transport quelconque d'un nuage dans un courant donné. La démonstration générale en est donnée dans l'annexe 2.

Insistons sur l'importance d'une conclusion valable non seulement en traceurs radioactifs en sédimentologie, mais en toute utilisation de traceurs, notamment en hydrologie, quel que soit le traceur (fluorescent, naturel, etc.).

De la même manière, dans un système Eulerien, dans lequel on porterait l'attention, sur le passage des particules dans une section particulière, on pourrait montrer que le centre de gravité de l'enregistrement obtenu ne correspond pas à la vitesse moyenne du traceur.

Ces points nous ont paru suffisamment neufs, généraux et importants, pour leur consacrer une annexe : annexe 2, rédigée en commun avec le Laboratoire de Mécanique des Fluides de Toulouse.

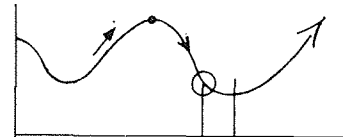
### 3) L'immersion.

Du point de vue appareillage, c'est un problème généralement bien résolu que nous n'aborderons pas.

Par contre, il semble nécessaire de dire quelques mots sur les conditions d'immersion à choisir judicieusement dans l'espace et dans le temps.

Le problème dans *l'espace*, c'est-à-dire immersion faite hors de points morphologiquement particuliers : seuil, mouille, en un milieu où les sédiments marqués et naturels sont identiques, est un point généralement bien traité.

Il l'est moins bien pour *le moment* d'immersion : il faut toujours immerger hors du moment où la dynamique est maximum : pas d'immersion en périodes de crues, pas d'immersion en périodes de forts coefficients de marée. Relativement à ces phénomènes de marées : attention au moment précis d'immersion ; si on immerge en étales courants BM ou PM c'est admettre que la mise en place se fera sous une seule des deux actions hydrauliques en cours : flux si étales de BM, reflux si étales de PM ; si on immerge



en milieu d'une marée, c'est soumettre le traceur à l'action hydraulique maximale dès son immersion, ce qui n'est pas favorable à une mise en place satisfaisante. A notre avis, il semble préférable d'immerger environ 2 h avant une étale, afin de disposer d'une mise en place sur 4 h, équivalente en flux et reflux.

De toute manière, il faudra tenir compte de cette mise en place et d'une façon générale, ne pas prendre pour temps  $t = 0$  le moment d'immersion, mais celui de la première détection et tout ramener à celle-ci.

### 4) Détection.

Du point de vue de détection, elle se fait à base uniquement de détecteurs à scintillations associés à une électronique SRAT portable, dans un appareillage français de très bonne qualité, disponible sur le marché surtout pour sortir en analogique, des modifications étant en cours pour sortir en numérique. En dehors de quelques perfectionnements permettant d'entrevoir des sorties directement compatibles avec les procédés de calculs automatiques, ou encore des installations types bouées à grande autonomie, peu de nouveautés sont à attendre dans ce domaine d'une technologie déjà bien avancée.

La méthodologie de détection comporte la mise en place

Facteurs dont la connaissance est utile pour l'exploitation d'une expérience de traceurs radioactifs.

Tableau 1

	MILIEU FLUVIAL	MILIEU MARITIME
Facteurs morphologiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— topographie;</li> <li>— relevé longitudinal axial;</li> <li>— relevés transversaux systématiques;</li> <li>— localisation des anomalies (mouilles, seuils, épis...);</li> <li>— nature et pente des berges.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— topographie;</li> <li>— relevé des profils en travers;</li> <li>— relevé des profits d'estran;</li> <li>— localisation des anomalies.</li> </ul>
Facteurs hydrométéorologiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— <i>débit liquide</i> <math>q = f(t)</math>;</li> <li>— <i>hauteur d'eau</i> <math>H = f(q)</math> (courbe de tarage);</li> <li>— <i>rayon hydraulique</i> <math>R_h = f(q)</math>;</li> <li>— <i>pente des eaux</i> ou pentes d'énergie;</li> <li>— précipitations (cas des torrents surtout).</li> </ul>	<p><i>Houles :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— hauteur - période, éventuellement cambrure;</li> <li>— plan de vagues;</li> <li>— angles d'attaque à la côte;</li> <li>— réflexion;</li> </ul> <p><i>Marée :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— coefficient;</li> <li>— hauteur <math>H = f(t)</math>;</li> </ul> <p><i>Courantométrie :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— locale : courant dominant;</li> <li>— au voisinage du fond (courant de retour);</li> </ul> <p><i>Vents dominants :</i> force;</p>
Facteurs sédimentologiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— nature et forme;</li> <li>— courbes granulométriques;</li> <li>— phénomène de triage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— nature et forme;</li> <li>— courbes granulométriques;</li> <li>— phénomène de triage connu.</li> </ul>

de la topographie, le choix des trajets du bateau, si possible réguliers et perpendiculaires à la direction de transport, la vérification de l'adhérence de la sonde au fond, la prospection systématique, etc., tous points qui doivent être adaptés à chaque problème, et sont en général relativement bien résolus.

5) *Le relevé des conditions hydrométéorologiques et leur utilisation* sont des points paradoxalement négligés jusqu'à ce jour, points sur lesquels on ne saurait trop insister.

En effet, parmi les pôles d'intérêt des traceurs radioactifs, on trouve en premier plan :

1. L'interprétation des résultats en fonction des conditions précédentes, interprétation sans laquelle l'expérience perd une partie non négligeable de sa valeur.
2. La comparaison entre les résultats obtenus et ceux prévisibles par l'emploi de très nombreuses formules semi-empiriques (voir comme exemple l'annexe 3).

Or ces formules, pour donner une représentation valable des phénomènes en cours, se doivent de connaître un certain nombre de paramètres locaux, entrant plus ou moins directement dans leur formulation.

Le tableau I réunit une liste type des paramètres locaux qu'il semble souhaitable de relever pour la meilleure exploitation de l'expérience réalisée.

Bref, c'est un domaine très important particulièrement délaissé.

Cependant, à force d'attirer l'attention des utilisateurs sur l'importance de ces relevés, ils semblent de plus en

plus sensibilisés à cette nécessité, et certaines expériences ont lieu de donner satisfaction dans ce domaine, par exemple la dernière qui a été programmée récemment avec MM. Allen et Klingebiel de l'IGBA sur un banc découvrant de Gironde.

En conclusion de cette partie méthodologie, nous espérons avoir montré que chaque point, chaque phase a été raisonné et examiné en détail et que la quasi-totalité de la méthodologie et de la technologie est au point et à la disposition des éventuels utilisateurs.

Il existe encore cependant deux aspects technologiques ou méthodologiques à résoudre :

— *le marquage des graviers*, phase granulométrique en gros comprise entre 3 et 20 mm, et qui s'adapte mal au marquage individuel des galets ou au marquage en masse, transposé du sable;

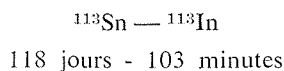
— *le marquage en mer à grande profondeur* (disons > 40 m), c'est-à-dire en définitive les déplacements de faibles envergures, sur de longues périodes et loin des côtes, sont mal adaptés aux procédés classiques ici présentés, ceci pour de multiples raisons. Nous nous préoccupons actuellement de rechercher et développer des procédés plus à même de donner satisfaction dans ce domaine, dans lesquels notamment détecteurs et immerseurs seraient reliés rigidement.

Un dernier mot sur une considération méthodologique importante : l'utilisation des traceurs courte période, pour des études en laboratoire sur modèles réduits ou en canal, se développe. Ces techniques sont susceptibles de prendre

## G. COURTOIS

un essor remarquable de par la mise au point de générateurs d'isotopes ou vaches radioactives. Une vache radioactive est constituée par l'association d'un couple de radioéléments l'un de longue période, l'autre de période courte descendant du premier et qu'on peut extraire périodiquement comme on trait une vache, par élution chimique.

Par exemple est actuellement mise au point la vache



Disposer d'un tel couple, c'est avoir à sa disposition, en laboratoire, un véritable générateur de radioéléments de courte période ; dans ce cas, l'indium qui permettra de travailler entre 2 et 6 h, temps suffisant pour maintes expériences en canal ou modèle réduit. C'est en définitive avoir chez soi la boîte du parfait petit atomiste.

Relativement à ces générateurs, on peut se reporter également à la communication de M. Caillot sur le fonctionnement de telles vaches et le marquage des sédiments avec les produits d'élution, et à celle de M. Migniot sur l'utilisation dans les modèles réduits.

### Les résultats Présentation et interprétation

C'est surtout dans cette voie que l'effort maximal a été porté et où le nombre de nouveautés est le plus grand, et sûrement le plus sujet à discussions.

Rappelons brièvement qu'on distingue les informations :

- *qualitatives* : qui décrivent les résultats obtenus et le cheminement du traceur : chenaux favorisés, transfert d'une rive sur l'autre, action descriptive des agents extérieurs, tels que courants, marées, houles, considérations morphologiques, etc. ;
- *semi-quantitatives* : dans lesquels certains des paramètres précédents sont chiffrés et notamment les vitesses : vitesse du transport, vitesse la plus probable, vitesse maximale et minimale ; largeurs occupées par le transport, diffusion, etc. ;
- *quantitatives* : réservées aux seules informations permettant d'atteindre le débit de charriage ou de suspension.

Pour traiter de la présentation et de l'interprétation de ces résultats, il est souhaitable de séparer pour la clarté de l'exposé, le cas où les informations sont recueillies de façon continue (cas des sables et des vases) du cas où il existe une information distincte par entité radioactive (cas des galets).

#### Cas des sables et vases.

Les informations sont obtenues de façon continue et les résultats peuvent alors être présentés sous trois formes différentes et complémentaires :

- les réseaux d'isochocs ;
- les diagrammes de transports ou encore diagrammes d'activité linéaire ;
- les diagrammes cumulés de transports ou encore diagrammes cumulés d'activité linéaire.

Pour présenter ces différentes formes, prenons l'exemple d'une expérience concrète, menée l'an dernier avec l'IGBA sur une immersion d'or 198 au Bec d'Ambès [26].

PREMIÈRE FORME (fig. 1).

Les réseaux d'isochocs sont de loin, la forme la plus parlante, se prêtant le mieux à une exploitation descriptive, mais également la moins exploitable, et même en allant plus loin, la plus fallacieuse.

Trois reproches essentiels :

a) Les courbes isochocs sont très marquées par la phase initiale : dans ce cas particulier d'estuaire soumis à marée, l'immersion ayant eu lieu 2 h avant l'étalement de BM, le premier réseau observé (détection du 19 septembre 1968, pour une immersion 24 h avant), est marqué par l'impulsion initiale et en conservera la marque tout au cours des temps, jusqu'à la fin des détections.

Ce serait une grave erreur d'en déduire que le mouvement résultant se fait vers le sud, c'est-à-dire que l'action du flot est prépondérante.

b) Il faut être très observateur, ou bien malin, pour en déduire des faits intangibles sur l'évolution apparemment anarchique de ce réseau. En fait, même d'une observation détaillée, on ne peut extraire que peu de chose de l'évolution des réseaux enregistrés.

c) On a tendance à examiner l'enveloppe extrême de ces courbes, l'isochoc 50 cps, pour déterminer l'étendue du transport, sans considérer :

- ni la probabilité de transport associée à cette courbe ;
- ni l'activité transportée par les courbes centrales.

*L'interprétation en est complètement faussée* : on examine volontiers le comportement des grains qui ont une chance sur 1 000 d'atteindre ces positions extrêmes, sans considérer les 50 % de grains restés au voisinage du point d'immersion.

C'est le reproche le plus important à faire à ce type de présentation.

#### DEUXIÈME FORME.

Il a donc été conçue une deuxième forme, le diagramme de transport, pour remédier aux précédentes insuffisances (fig. 2 b).

Le diagramme de transport est un diagramme dans lequel on porte en abscisse, la distance le long d'un axe de référence aussi voisin que possible de la direction moyenne de transport, et en ordonnée la totalité de l'information recueillie sur un traversier perpendiculaire à cet axe.

Ainsi dans l'exemple envisagé, la figure 1 présentée montre l'évolution de cette forme entre deux détections espacées de deux jours pendant lesquels s'est fait sentir l'influence d'une marée d'équinoxe de coefficient 107.

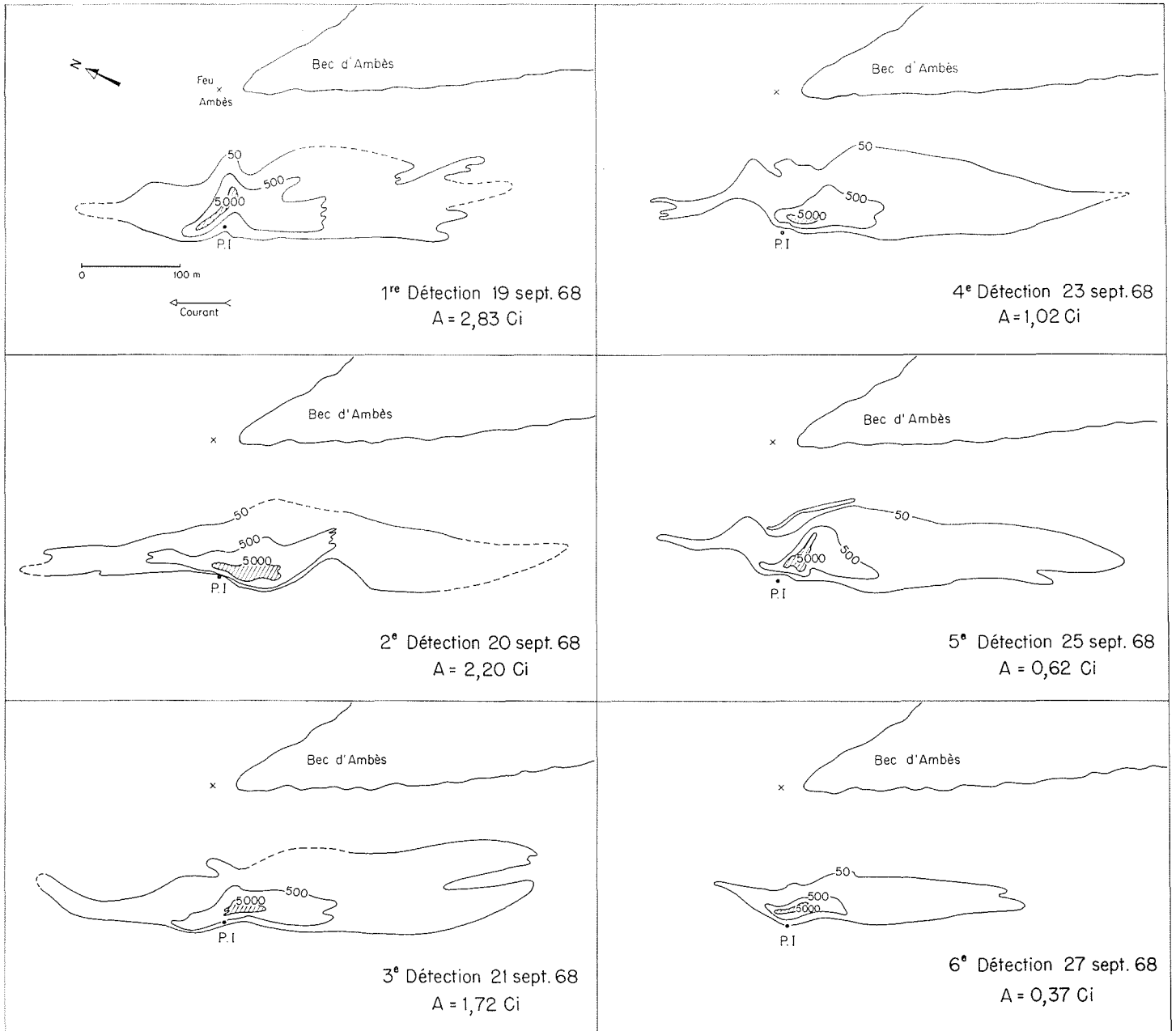
L'interprétation devient beaucoup plus facile, beaucoup plus exacte :

1) La majeure partie de l'activité est située sur une distance de 60 m autour du point d'immersion et non sur 450 m comme pourrait le laisser croire le réseau d'isochocs.

2) La marée de fort coefficient érode le pic d'activité, le transporte vers le sud montrant une action prépondérante du flot.

TROISIÈME FORME (fig. 2 c).

Le diagramme cumulé de transport, tout à fait semblable au diagramme cumulé des courbes granulométriques, est l'intégrale ramenée à 100 % du diagramme



1/ Réseaux d'isochocs (Bec d'Ambès).

précédent ; ce diagramme cumulé complète très utilement le diagramme précédent, en donnant des moyens d'interprétation du transfert des masses.

Ainsi dans l'exemple envisagé, en comparant les deux diagrammes cumulés des deux journées considérées, on observe immédiatement le basculement traduisant l'effet enregistré : son sens : vers le sud, action de flot prédominante, son intensité, l'étalement produit, par exemple en considérant l'espace entre les quartiles inférieurs et supérieurs :

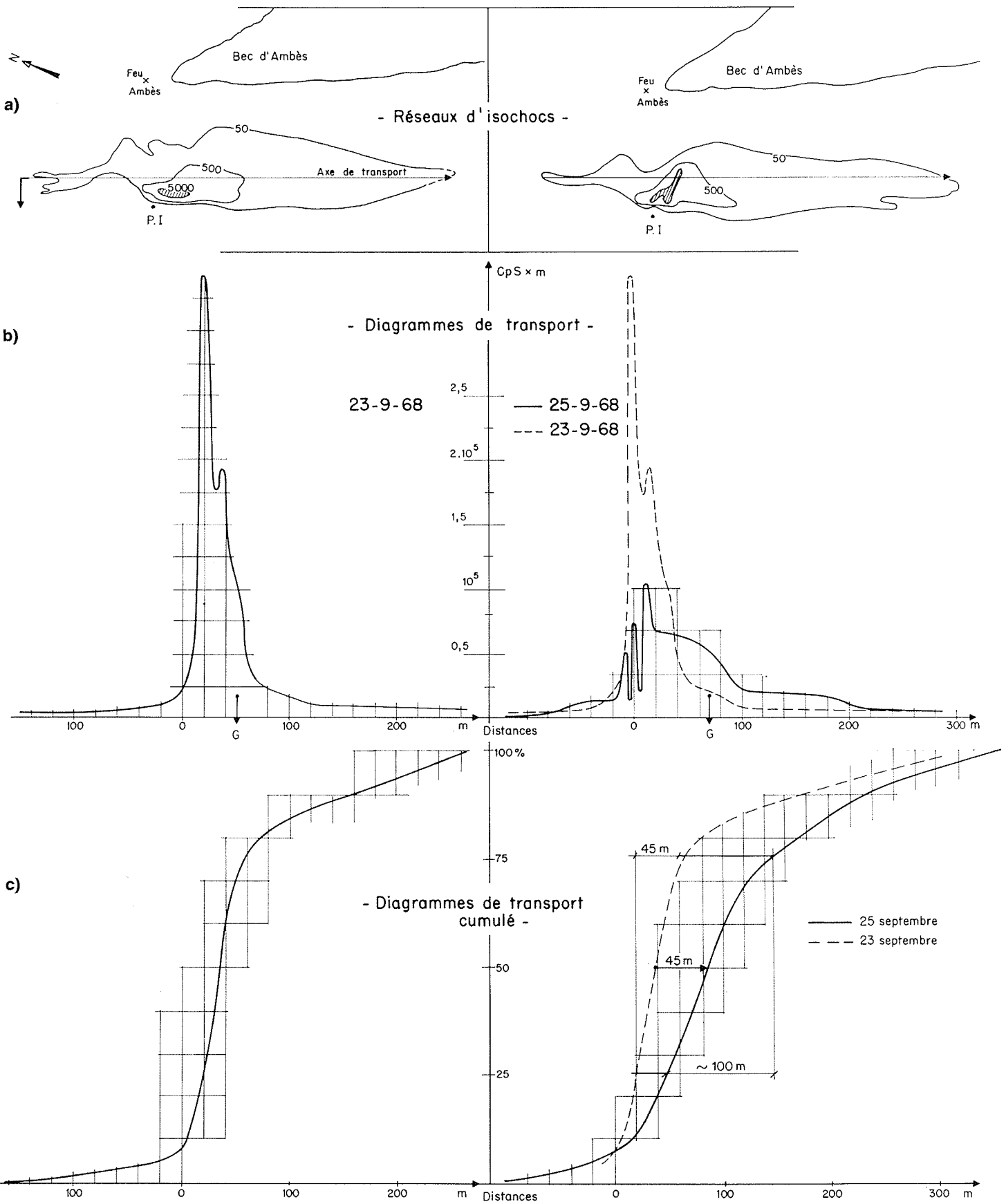
1<sup>re</sup> journée ..... 45 m  
 2<sup>e</sup> journée ..... 100 m

Ainsi donc les présentations adoptées, moins parlantes certes, sont de formes, pour employer une antithèse, qui permettent de *chiffrer le qualitatif* pour le rendre partiellement quantitatif. Dans l'expérience brièvement pré-

sentée, nous avons construit, sur les bases de présentations précédentes, un certain nombre de paramètres chiffrés concernant les longueurs de transport nord-sud, les vitesses moyennes, instantanées, entre deux détections, les largeurs transportant 50 %, 80 % de l'activité, etc., tout paramètre qui permet de faire une bonne interprétation des phénomènes rencontrés. C'est vers ces formes de présentation que nous encouragerions l'utilisateur, en l'engageant notamment pour complément d'information, à se reporter à la référence [22].

*Pour passer de ces formes de présentation à un résultat quantitatif*, nous avons préconisé dans le passé l'utilisation d'une méthode que nous avons développée et utilisée depuis quelques années : la *méthode du bilan des taux de comptage* [21, 22].

Faire un bilan des taux de comptage, c'est estimer l'information totale, c'est-à-dire le nombre total de chocs



2/ Diagrammes de transport et de transport cumulé (Bec d'Ambès)



par seconde, N pouvant être récupéré sur le nuage observé :

$$N = \oint n ds$$

ds étant un élément de surface du nuage où on recueille l'information élémentaire n chocs sur seconde.

On conçoit aisément que cette valeur N est d'autant plus importante que le nuage de traceur est moins enfoui, et que par suite il existe une relation biunivoque entre E épaisseur de transport et  $N = \varphi(E)$ .

La figure 3 montre le principe du calcul de N.

Nous avons explicité cette relation [23, 24] qui permet de trouver E, à partir de l'information N et des caractéristiques de l'appareillage utilisé, cette épaisseur de transport E étant elle-même reliée au débit massique Q cherché par :

$$Q = \rho \cdot l \cdot V_m \cdot E$$

$\rho$  : poids spécifique du sédiment pesé sous l'eau;

l : largeur de transport;

$V_m$  : vitesse moyenne de transport.

Ainsi donc, la connaissance de N, bilan des taux de comptage, permet de déterminer E, lui-même entrant dans la détermination de Q.

En fait, après quatre ans d'utilisation de cette méthode, nous pouvons faire le point de son emploi de la manière suivante :

1) La méthode donne moins et elle donne plus :

— elle donne moins, car moins universelle que nous aurions pu le croire elle ne donne pas à coup sûr une information quantitative ; nous verrons les restrictions ultérieurement ;

— elle donne plus, car faire un bilan des taux de comptages est une opération rentable, outil précieux et même indispensable pour l'interprétation des résultats.

2) Dans le cas où elle s'applique réellement, elle permet de donner des résultats satisfaisants.

Examinons ces points :

Le tableau qui suit, montre que l'application de cette méthode peut donner des informations quantitatives. Nous avons pris un exemple en rivière, un exemple en mer.

MILIEU FLUVIAL : Débit quantitatif du Cher (Résultats en t/j [25])			
DATES	MÉTHODE DE BILAN (t/j)	FORMULES	
		Meyer- Peter (t/j)	Kalinske (t/j)
16 avril 1966 . . . . .	95 ± 20	85	77
21 avril 1966 . . . . .	52 ± 6	110	86
10 mai 1966 . . . . .	33,4 ± 4	49	64
25 mai 1966 . . . . .	33,5 ± 4	29	55

MILIEU MARIN : Littoral roussillonnais. Expérience menée avec le Centre de sédimentologie marine de Perpignan.

Octobre 1966 :

— au large de Saint-Cyprien [17]  $Q_m$  sur la période envisagée ;

— traceurs radioactifs 2 à 2,3 t/j vers le nord par mètre linéaire perpendiculaire à la plage ;

— par formule semi-empirique 2,7 t/j, dépouillement de M. Migniot du L.C.H.F., basée sur l'énergie des houles.

Avril 1967 :

— au large de Barcarès [18]  $Q_m$  1,4 à 2 t/j/m linéaire.

Dans cette expérience, les épaisseurs trouvées par carottage et par la méthode du bilan des taux de comptages sont comparables.

Ces exemples ne sont pas uniques et ils servent à vous montrer que la méthode peut donner des résultats quantitatifs.

Par contre, l'application irraisonnée de la méthode serait une grave erreur. En fait, la méthode élaborée n'est valable :

a) que pour un modèle où il y a réellement charriage sur une épaisseur donnée ;

b) où l'activité a été apparemment toute retrouvée. Or celle-ci peut avoir disparue partiellement,

à cause de phénomènes hydrauliques :

— érosion, c'est-à-dire remise en suspension ;

— recouvrement ;

— dispersion trop grande ;

— disparition dans des zones inaccessibles à la détection.

à cause de raisons radioactives :

— saturation des détecteurs par un signal trop important (pertes au comptage).

Ainsi, sans vouloir entrer dans le détail, dans le cas d'une expérience sur le Cap-Ferret avec le L.C.H.F. [4], nous avons pu démontrer par examen de la variation du bilan des taux de comptage dans le temps, que l'action de la houle sur la période envisagée avait été quasiment nulle au-delà de 10 m de profondeur. C'est par excellence le cas où l'estimation du bilan des taux de comptage, appliquée brutalement dans une formule de débit, eut donné des résultats parfaitement erronés, mais où son interprétation raisonnée a permis d'obtenir beaucoup plus que l'usage des formes de présentation précédemment évoquées.

**Cas des galets.**

Dans ce cas, la méthode utilisée est la méthode du nombre limité de grains [23] dans laquelle les galets détectés individuellement sont repérés dans le temps par leurs trois coordonnées dans l'espace, x, y, z.

x : distance de transport suivant l'axe de transport ;

y : distance transversale à cet axe ;

z : profondeur d'enfouissement.

L'ensemble des données ainsi recueillies, permet de calculer la vitesse moyenne de déplacement de l'ensemble  $V_m$  ainsi que la profondeur d'enfouissement E et par suite de calculer le débit de charriage par la formule précédente :

$$Q = \rho \cdot l \cdot V_m \cdot E$$

Généralement, quand les conditions hydrauliques le permettent, tout dépouillement d'une expérience de galets est accompagné d'une estimation des débits de charriage obtenus par d'autres moyens et notamment par l'emploi de formules semi-empiriques.

Or, s'il arrive que les résultats soient en bon accord (exemple : expérience du Hourdel avec le L.C.H.F. en 1966 : transport estimé par radioactivité 17 000 m<sup>3</sup>, par engrèvement d'épis 10 500 m<sup>3</sup>, par formule semi-empirique

## G. COURTOIS

32 000 m<sup>3</sup>), il est loin d'en être toujours ainsi dans le domaine de l'hydraulique fluviale, plus particulièrement dans les régimes torrentiels, où pourtant la formule de Meyer-Peter a plutôt bonne réputation.

Le problème semble d'une telle importance que nous avons voulu lui consacrer une annexe particulière (annexe 3) dans laquelle, sur le cas concret d'une expérience dans un torrent vosgien, on met en évidence une différence d'un facteur 20 entre les 1 700 t de charriage trouvés par l'emploi de traceur et les 34 000 t qui ressortent de l'application de la formule de Meyer-Peter [24].

On ne prétend pas donner une explication satisfaisante à un tel désaccord mais soulever le problème général de la discordance entre ces deux modes d'obtention de débits de charriage, en espérant que l'avenir se chargera de lever l'incertitude.

Pour ce problème, nous reportons donc le lecteur à l'annexe 3.

### Bilan des applications françaises

Pour conclure dans ce domaine, et afin de mettre en évidence le développement de ce type d'applications en France, on a dressé un rapide bilan des expériences faites :

BILAN DES EXPÉRIENCES EN NOMBRE (fig. 4).

- 68 depuis le début 1954 : inclus les expériences sur modèles réduits, canal, développement de jauges, etc.;
- 61 campagnes sur le terrain dont 10 à l'étranger représentant plus de 200 immersions : 2 Niger, 2 Oubangui, 2 Turquie, 1 Cambodge, 1 Gabon, 1 Spitzberg, 1 Venezuela ;
- 44 de ces expériences depuis les cinq dernières années (1965 à 1969) : 65 %.

Le taux d'accroissement des expériences et de demandes est montré dans la figure 4. Le fort taux de demandes non satisfaites en 1969, provient évidemment d'une partie de demandes qui verront leurs réalisations en 1970 ou ultérieurement.

BILAN DES EXPÉRIENCES OU PARTICIPATION.

Notre section a participé à toutes ces expériences, parfois d'une façon extrêmement faible dans la simple préparation du traceur, mais la plupart du temps d'une façon très active.

En dehors de cela, nous trouvons :

- 26 expériences réalisées par le L.N.H. de Chatou, dont 15 d'une façon pratiquement autonome,
- 10 expériences réalisées avec le Centre de Géologie marine de Perpignan,
- 7 expériences réalisées avec le L.C.H.F. (3 expériences terrain, 3 études en canal et modèle réduit, 1 développement de jauge),
- 4 expériences réalisées avec le Centre de Géographie Appliquée de Strasbourg.

Il convient de citer encore beaucoup d'autres Centres dont :

- l'IGBA ;
- le Centre de Géologie marine de Nantes ;
- le C.R.E.O. ;
- l'Institut français de Géographie de Paris ;
- le Centre de Géologie de Caen ;
- le Centre de recherches géodynamiques (Villefranche, Paris et Thonon-les-Bains).

LA CARTOGRAPHIE DES 36 EXPÉRIENCES menées en France depuis 1965 est présentée figure 5.

Cette cartographie fait ressortir deux zones de concentrations d'expérience : une située tant en mer qu'en torrents dans le Roussillon, l'autre dans la région s'étendant de la Loire et son estuaire, au bassin d'Arcachon.

UTILISATIONS DIVERSES DE TRACEURS.

Pour terminer, il sera donné des informations succinctes sur quelques autres utilisations de traceurs en sédimentologie ou dans des domaines voisins.

— *L'érosion du sol*, mis au point par De Ploeye en Belgique, qui a su développer des techniques analogues aux traceurs en sédimentologie pour étudier le transfert d'un sol marqué sous une action érosive : il a conçu des méthodes de bilan global et des méthodes permettant d'étudier un phénomène particulier : l'effet de ruissellement ou l'effet de splash d'une goutte de pluie. Une expérience a été menée en France dans les Vosges avec le Centre de Géographie de Strasbourg, malheureusement sur un site en érosion très faible.

— *Les études de stabilité de massif et de glissement de terrain* sont des problèmes également abordables par traceur radioactif, en marquant le massif à différentes profondeurs, la détection intervenant périodiquement associée à un système géodésique fiable. Tout est encore à faire dans ce domaine nouveau qui peut intéresser géologues et géographes d'une part, le Génie civil d'autre part (Tassement et divergence des massifs et remblais).

— L'enfouissement de particules marquées dans le sol et leur déplacement sous une action météorologique, tel que l'étude du *phénomène de microcryoturbation*.

— L'étude sur colonne de précipitation sédimentaire sous la variation périodique des caractéristiques locales, tels que teneur en CO<sub>2</sub>, action chlorophyllienne, etc.

Nous avons commencé une expérience très intéressante dans ce domaine sur le lac Nantua avec le Centre de Recherche et Géodynamique de Thonon-les-Bains, expérience qui a malheureusement été interrompue.

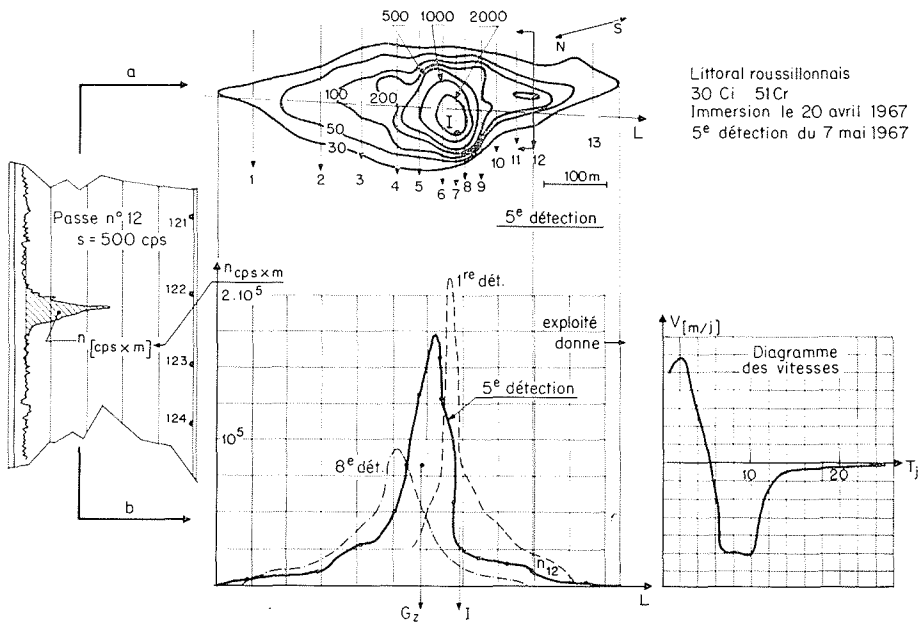
### Conclusion

Dans le présent article, déjà long, nous avons volontairement laissé de côté, des aspects importants du problème tels que :

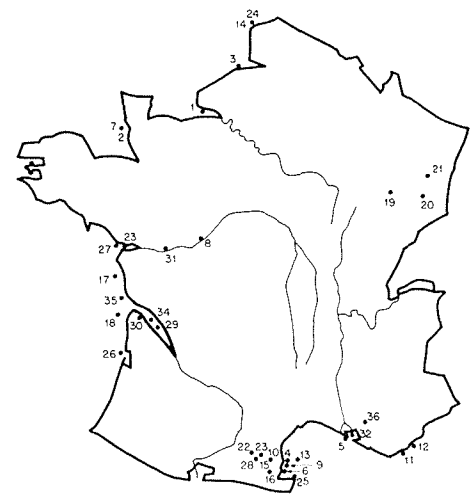
- comparaison avec les autres traceurs et notamment les traceurs fluorescents ;
- les aspects de sécurité et les problèmes administratifs liés à ces aspects ;
- les problèmes de l'équipement et du prix de revient.

Tous ces problèmes ne sauraient être abordés ici. Nous avons voulu simplement faire le point sur les possibilités d'emploi des traceurs et l'état d'avancement de la méthodologie actuelle. Certains que la potentialité maximale de cette technique n'a pas été encore atteinte, nous ne saurions trop encourager les lecteurs à faire preuve d'imagination et à penser aux possibilités de traceurs dans tout problème où un mouvement de particules intervient.

Pour tous ces problèmes nouveaux, ainsi que pour les divers aspects non traités précédents, les utilisateurs peuvent alors s'adresser à des organismes spécialisés qui peuvent intervenir en tant que conseils aux membres exécutants.

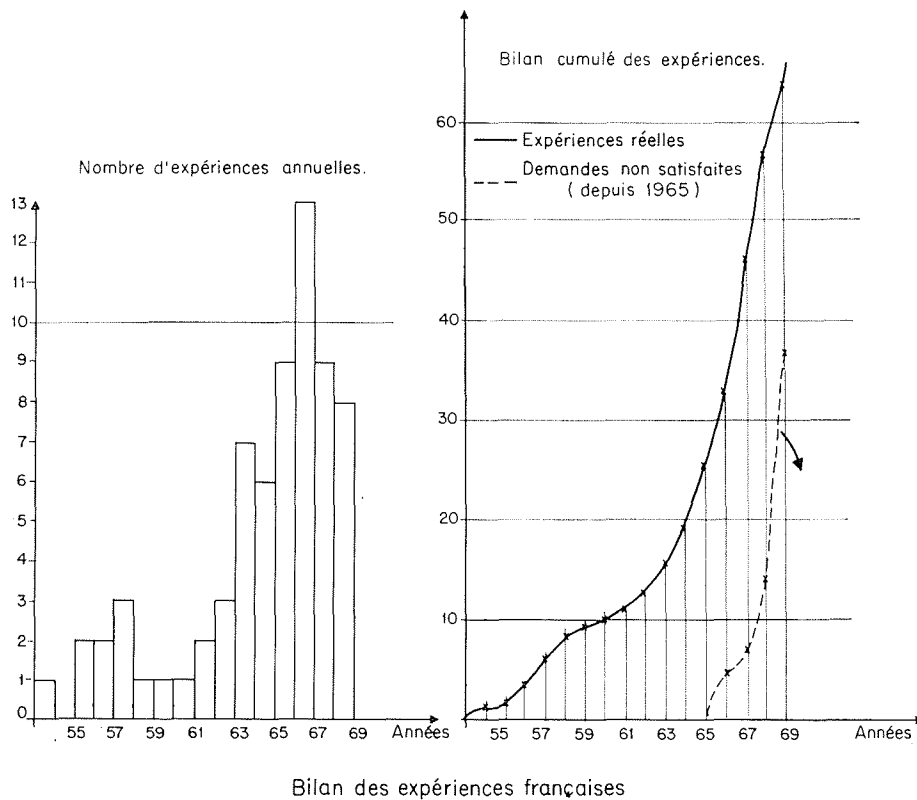


3/ Principe de la méthode du bilan des taux de comptages.



Localisation des expériences (36) en France de sédimentologie radioactive depuis 1965

5/ Cartographie des expériences.



Bilan des expériences françaises

4/ Bilan des expériences en nombre.

## Références bibliographiques

- [1] COURTOIS (G.). — Emploi des radioéléments en sédimentologie. Conférence A.I.E.A. Use of Isotopes in Hydrology, Vienne 14-18 novembre 1966 et C.E.A. série *Bibliographies*, n° 84 (1967), 74 p.
- [2] ROMANOVSKY (V.). — Utilisation des radio-isotopes en sédimentologie. Rapport EURATOM, 3749 f., 128 p.
- [3] BEAUCHESNE (P.) et COURTOIS (G.). — Etude du mouvement des galets le long de la côte des Bas-Champs de la Somme. Utilisation de traceurs radioactifs. *Cahiers Océanographiques*, XIX, 8 (septembre-octobre 1967), p. 613-625.
- [4] COURTOIS (G.). — Etude du déplacement des sables au large du Cap-Ferret à l'aide d'indicateurs radioactifs.  
1) Document L.C.H.F., MB 613.029.  
2) Rapport SAR, S 69-12 (1969), 21 p.
- [5] RAMETTE (M.) et HEUZEL (M.). — Le Rhône à Lyon, étude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs. *La Houille Blanche*, 17, n° spécial A (mai-juin 1962), p. 389-399.
- [6] CHABERT (J.) et REMILLEUX (M.). — Etude de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger dans la république du Mali. *La Houille Blanche*, n° spécial B, (1960).
- [7] (Anonyme). — Etude du charriage de l'Oubangui par traceurs radioactifs. E.D.F., Rapport L.N.H., Chatou (1964).
- [8] (Anonyme). — Etude de l'amélioration de la navigabilité de la Loire sur le site Nantes-Angers. E.D.F., Rapport L.N.H., Chatou, janvier 1962.
- [9] (Anonyme). — Etude du charriage de la Loire par traceurs radioactifs sur le site de la centrale nucléaire E.D.F. 4. Comparaison nature-modèle. E.D.F., Rapport interne L.N.H., Chatou, Hg/FI-146 (mars 1965).
- [10] PILON (J. J.) — Mesures par traceurs radioactifs du mouvement des sables aux Pays-Bas 1957-1962. C. R. Réunion, Bruxelles 3-5 octobre 1963, EURISOTOP, *Cahier d'information* n° 8, communication n° 15, (1965), p. 201-314.
- [11] DOLEZAL (R.), PETERSEN (M.), BECKER (H.), GÖTTE (H.), SCHULZE-PILLOT (G.), THOMSCHKE (E.), BÖTTCHER (B.), NACHTIGALL (K.) und SEIBOLD (E.). — Entwicklung und untersuchung eines radioactiven indikator verfahrens zur messung der kinetic, der erosiun und der sandtransporter an sandigen braudungsküsten. *Rapport EURATOM*, 2167 d.
- [12] HEUZEL (M.) et ANGER (M.) — Compte rendu des mesures effectuées sur le littoral entre Gravelines et Dunkerque. Texte principal : février 1968, additif : janvier 1969; E.D.F., rapport L.N.H., Département Essais.
- [13] (Anonyme). — Golfe de Fos. Campagne de mesure de mouvements de sables par traceurs radioactifs 1963-1964, 1964-1965. E.D.F., rapport interne L.N.H., Chatou (1966).
- [14] MARTIN (J. M.), MEYBECK (M.) et HEUZEL (M.) — A study of the dynamics of suspended matter by means of natural radioactive tracers; an application to the Gironde Estuary. A paraître : *Sedimentology*.
- [15] ANGUENOT (F.), CARBONNEL (J.-P.), COURTOIS (G.), DANION (J.) et FORSBERG (H.). — Etude du charriage du Stung-Sen au Cambodge. I.A.E.A. *Technical Assistance Report*, n° 140, Vienne (1964).
- [16] COURTOIS (G.) et GASNIER (M.). — Etudes de charriage de la Doller au moyen de galets radioactifs.
- [17] COURTOIS (G.) et MONACO (A.). — Etude comparative de deux méthodes radioactives d'évaluation massique des transports sédimentaires littoraux. *Cahiers océanographiques*, 20, p. 775-783, (9 novembre 1968).
- [18] COURTOIS (G.) and MONACO (A.). — Radioactive methods for the quantitative determination of coastal drift rate. *Marine Geology*, 7, p. 183-206, (1969).
- [19] SAUZAY (G.) et COURTOIS (G.). — Sur les masses de sédiments à injecter dans une expérience de traceurs radioactifs en sédimentologie dynamique. *Rapport interne S.A.R.*, SAR/S/68-8, 25 p.
- [20] COURTOIS (G.), JEANNEAU (B.), ALLEN (G.) et KLINGEBIEL (A.). — Etude de la stabilité d'un banc de sable sur le site du Bec d'Ambes pour l'emploi de traceurs radioactifs. *Rapport interne S.A.R.*, SAR/S/69-4, 27 p.
- [21] COURTOIS (G.) et SAUZAY (G.). — Les méthodes de bilan des taux de comptages de traceurs radioactifs appliquées à la mesure des débits massiques de charriage. *La Houille Blanche*, 21, n° 3, p. 279-290, (1966).
- [22] SAUZAY (G.). — Méthode du bilan des taux de comptages d'indicateurs radioactifs pour la détermination du débit de charriage des lits sableux. Thèse d'ingénieur-docteur, faculté des Sciences de Toulouse (20 novembre 1967); rapport C.E.A. R-3431.
- [23] COURTOIS (G.). — Possibilités d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans les études quantitatives de mouvement de sédiments. *Intern. Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 15, n° 11, (novembre 1964), p. 655-663.
- [24] COURTOIS (G.) et GASNIER (M.). — Etude de charriage de la Bruche et de la Mossig au moyen de galets radioactifs. *Rapport interne S.A.R.*, SAR/S/69-5, 36 p.

