



# Traceurs et jauges nucléoniques éclairent la **dynamique sédimentaire** en milieu fluvial et littoral

La mécanique des fluides ne pouvant décrire les phénomènes liés aux transports de sédiments par ses seules équations, l'apport des techniques nucléoniques va contribuer à éclaircir des problèmes sédimentaires posés par l'action des courants et des houles.



Le navire océanographique *Hermano Ginez* en opération de détection de traceurs pour la mesure des coefficients de dispersion sur le fleuve Rio Orinoco (Venezuela).

Les transports **sédimentaires** induits par l'action des courants et des houles demeurent encore mal connus malgré le poids économique des ouvrages et des travaux rendus indispensables pour en contre-carrer les nuisances. Au rang de celles-ci figurent notamment le comblement des retenues, les difficultés de fonctionnement des dispositifs évacuateurs, l'impact des opérations de vidange, l'érosion du littoral, les travaux de dragage, les rejets de toutes sortes dans le milieu aquatique de polluants particuliers... Même en faisant appel aux théories les plus élaborées, la mécanique des fluides demeure encore impuissante à résoudre les problèmes posés au moyen des seules équations. En conséquence, expérimentations et mesures demeurent incontournables aussi bien en milieu naturel qu'en **modèle physique**. Or, le manque de moyens pour réaliser ces mesures entrave la réflexion sur les processus physiques des transports solides et, *a fortiori*, sur l'estimation de leur intensité. Ceci explique le développement des **techniques nucléoniques** (traceurs et **jauges**) utilisant l'interaction **rayonnement ionisant**/matière et leur perfectionnement. Ces techniques offrent, en effet, de précieux

avantages en raison de leurs propriétés spécifiques permettant notamment d'opérer :

- des mesures directes de traceurs en nature et en modèle physique ;
- des **mesures lagrangiennes** des déplacements avec observation d'image de la répartition spatiale du traceur à un instant donné ;
- des mesures avec suivi, sur une faible proportion (traceurs), du contenu sédimentaire assurant la rapidité d'auscultation des phénomènes ;
- des mesures en continu des **turbidités**, même au travers d'une paroi opaque...

Ces techniques se sont développées, de manière pragmatique, au cours de tentatives pour anticiper et satisfaire les demandes d'utilisateurs comme certains ports français ou étrangers, des laboratoires d'hydraulique, les directions départementales de l'équipement, les universités, le Centre d'études techniques maritimes et fluviales, l'**Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer)**, ou encore des organismes internationaux comme l'**Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)** et l'**International Water Management Institute**. Aujourd'hui, à côté des



Mise à l'eau d'un traîneau de détection de radiotraceurs pour la mesure du charriage de sable en zone littorale.

traceurs **radioactifs**, se développent des techniques de traçage non radioactifs (**fluorescents**, radioactivables, magnétiques...). Leurs performances, très variées, permettent de répondre à des problématiques où les traceurs radioactifs ne peuvent s'envisager.

### Les traceurs

L'utilisation des traceurs est désormais bien connue. La première étape consiste à introduire un sédiment marqué par un **élément** doté d'une propriété particulière mesurable dans la zone à étudier. La suivante vise à suivre les déplacements du nuage formé par les particules marquées, en fonction de l'espace et du temps, ce qui nécessite l'utilisation de détecteurs appropriés ou de prélèvements. Le cycle s'achève par l'interprétation des résultats quantitatifs en fonction des paramètres hydrométéorologiques enregistrés par ailleurs. Les informations recueillies étant globales, la méthode est dite intégratrice. En fait, il n'apparaît pas possible de déterminer les paramètres fondamentaux tels que la vitesse critique d'entraînement ou la rugosité des fonds. Pour ces expérimentations, les chercheurs utilisent deux sortes de traceurs.

#### Les traceurs radioactifs

Aujourd'hui, les spécialistes disposent d'un grand nombre de **radionucléides** (tableau) leur permettant d'aborder, en nature ou en laboratoire, les différents problèmes "sédimentologiques" relatifs à une très large gamme de particules allant de la vase aux galets.

- Pour les galets (d'un diamètre supérieur à 5 cm), le marquage s'effectue individuellement avec une source radioactive formée d'un fil métallique d'**iridium 192**, de **tantale 182** ou d'**argent 110**;
- Pour les sables (de diamètre entre 0,040 à 2,5 mm), choisis en raison de leur distribution **granulo-**

**métrique** identique à celle des sédiments naturels du site ou comme fraction représentative de ceux-ci, il faut procéder par simulation au moyen de verres spéciaux d'une densité de 2,65; ces verres sont ensuite rendus radioactifs après un court séjour dans un réacteur nucléaire.

- Les vases ou sédiments cohésifs (de diamètre inférieur à 40  $\mu\text{m}$ ) se marquent directement par **chimi-sorption** avec des solutions radioactives; les réactions physico-chimiques sont sélectionnées et conduites de telle sorte que le comportement hydrodynamique des sédiments marqués reste identique à celui des sédiments naturels.

L'usage des générateurs d'**isotopes** radioactifs a trouvé d'importants développements dans les expérimentations en laboratoire, notamment en médecine nucléaire, avec une utilisation quotidienne. Systèmes automatiques et protégés, ils permettent d'obtenir aisément une solution radioactive au moment de l'emploi. Les quantités nécessaires au bon déroulement d'une expérience de traceurs sont faibles: 200 galets par site, 0,25 à 1 kg de verre radioactif ou encore 5 à 15 litres de suspension de vase à 200 g/L suffisent généralement, ce qui facilite la manipulation des produits sur le site, leur immersion et surtout leur intégration rapide au milieu. L'introduction de sédiments-traceurs peut alors s'effectuer soit par un dépôt sur les fonds, soit encore par la création d'un nuage de particules en suspension en simulant un rejet, soit enfin par un mélange avec des sédiments fins, dans un puits de drague, avant de procéder aux opérations de rejet. Aux **détecteurs** de rayonnement à **scintillation** de type océanographique, à la fois sensibles et résistants, s'ajoute une électronique de mesure embarquée portable et autonome. En les associant, il s'avère possible d'entreprendre des expériences dans des pays lointains avec des moyens nautiques limités. Il s'agit donc d'une méthode particulièrement robuste et compatible avec des applications de terrain. En effet, les capteurs peuvent trouver leur place soit à la remorque d'une embarcation de dimensions modestes (10 à 20 m de longueur), soit sur le fond pour les mesures de charriage, soit en suspension pour l'étude des rejets (figure 1). Dans ce dernier cas, l'association des détecteurs avec des capteurs de pression permet de donner la profondeur d'immersion. La position du bateau fait également l'objet d'un relevé en continu par un système de radiolocalisation.

isotope	période	forme	domaine d'emploi
In 113m	100 min	dépôt	modèle physique étude de dispersion
Tc 99m	6 h	dépôt	station d'épuration étude de dispersion modèle physique
Au 198	3,7 j	dépôt verre broyé	étude de dispersion rejet de produits de dragage
Hf 181	45 j	dépôt	sédimentologie station d'épuration
Hf 175	70 j	dépôt	sédimentologie station d'épuration
Tb 160	60 j	dépôt	sédimentologie
Ir 192	74 j	verre broyé	sédimentologie
Ta 182	115 j	source	sédimentologie
La 140	40 h	activation	idem Au 198

Tableau. Exemple de radionucléides utilisés comme traceur pour l'étude de la dynamique sédimentaire.

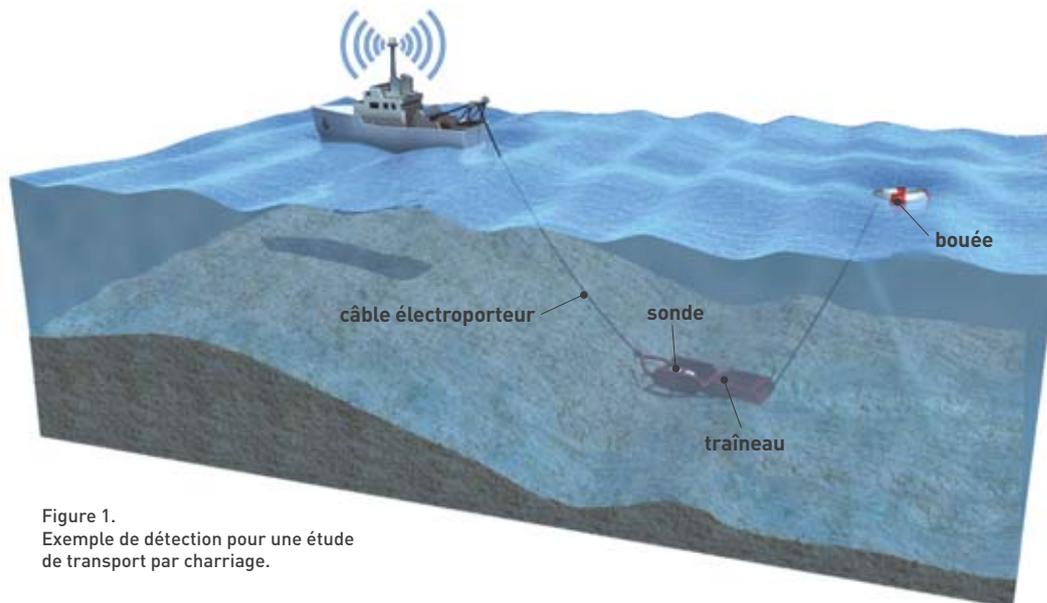


Figure 1. Exemple de détection pour une étude de transport par charriage.



Détection de traceurs sur le fond. Étude du charriage des sédiments sableux du Rio Orinoco (Venezuela).

L'opération terminée et les résultats de mesures rassemblés, leur interprétation va apporter un lot de conclusions qualitatives et quantitatives. Pour les déplacements sédimentaires sur les fonds, il s'agit de la ou des directions du mouvement, des vitesses maximales et moyennes pour les déplacements horizontaux, de la quantité de sédiments transférés par charriage, de la remise en suspension ou le recouvrement éventuel... En revanche, pour les déplacements sédimentaires de suspensions, artificiellement rejetés dans le milieu (par exemple, les rejets industriels et urbains ou les produits de dragage) les renseignements apportés concernent l'excursion et la dérive (direction, vitesse horizontale), des coefficients de dispersion longitudinaux et transversaux, de taux de dilution en fonction du temps et de la distance parcourue par le nuage, de la vitesse moyenne de sédimentation des particules, la quantité de matière déposée sur les fonds...

L'utilisation des traceurs dans la nature a donné lieu à toute une série de travaux :

- des études systématiques de sites, comme celles réalisées dans le port et sur le littoral de Zeebrugge (Belgique), dans la baie de Seine, au Cap Breton ou à Honfleur... Dans ce cadre, une équipe du CEA,

conduite par Charles Beck, a notamment réalisé une recherche très complète sur le littoral de la mer du Nord, région maritime se caractérisant par une succession de sites avec des fonds sableux sous forme de dunes hydrauliques, de mégarides et de rubans. La technique utilisée est celle du sonar latéral assorti de prélèvements ponctuels mais nombreux. L'immersion de traceurs radioactifs (iridium 192), en huit points situés sur trois zones différentes, à des profondeurs comprises entre - 4,5 m et - 20 m, a permis d'établir des cartes **bathymétriques** précises. Le large éventail des résultats obtenus met en évidence une très grande diversité de la dynamique sédimentaire de part et d'autre du cap Gris-Nez. Ce résultat explique, en partie, la très forte érosion des plages situées au nord-est de Wissant et le transit sédimentaire, intense mais très variable selon la profondeur, produit par l'action des houles et des courants de marées. Ce transit demeure faible (environ  $0,03 \text{ m}^3/\text{m/j}$ ) si la profondeur dépasse - 15 m mais atteint  $0,2 \text{ m}^3/\text{m/j}$  si la hauteur de l'eau, à basse mer, reste inférieure à - 5 m. Il convient de noter que des calculs théoriques conduisent à une estimation moyenne de  $0,4 \text{ m}^3/\text{m/j}$ , à une profondeur de - 18 m, pour des courants de  $0,5 \text{ m/s}$  à 1 m des fonds : des valeurs calculées non encore confirmées par les mesures ;

- des études pour connaître le rejet des produits de dragage, par exemple, celles effectuées dans les ports du Havre, d'Antifer, de Lorient, de Singapour...
- des études sur le recyclage des produits de dragage opéré dans les ports de Lorient et notamment de Zeebrugge où il a été observé que plus des 2/3 des matériaux rejetés à 18 km au large de la côte, par des fonds de - 15 m, reviennent rapidement (moins de 100 jours) vers la côte sous l'action des courants de marée. Ces matériaux participent donc au transit littoral avant de se redéposer dans les eaux calmes des bassins portuaires. Ce recyclage, sur une zone longue de plus de 60 km, a été mis en évidence grâce à des éléments radioactifs (le **hafnium** et le **terbium**) inexistant dans la nature. Réalisées par des laboratoires spécialisés, certaines mesures ont nécessité une dilution de  $10^{-14}$  ;
- des études à caractère général sur le mécanisme de formation du "bouchon vaseux/crème de vase" dans un estuaire ou encore l'action de la houle sur les transports sédimentaires ;
- des études sur les transports solides en régime torrentiel dont la complexité fait intervenir trop de para-

mètres pour un traitement par les seuls **modèles** mathématiques. D'où, le grand nombre d'expériences réalisées notamment dans les Pyrénées orientales (Verdoble, Cady, Têt, Lentilla, Agly), dans les Vosges (Bruche, Mossig, Doller), en Corse (dans le Fium'Orbo) mais aussi, et avec beaucoup de succès, sur les cordons littoraux de galets;

- des études de rejets sous forme particulière (matières organiques et argileuses). Celles-ci aboutiront d'abord à l'analyse systématique des rejets urbains en mer contaminés par des polluants chimiques et biologiques; mais aussi au traitement de la pollution mécanique des rivières (Doubs) par les fines particules remises en suspension par le dragage. Les résultats de ces études ont donné lieu à l'élaboration de recommandations sur les conditions d'extractions des sables et graviers;

- des études sur les **modèles physiques** et **canal de laboratoire** avec, à la clé, les premières théories et techniques expérimentales d'estimation du transport solide dans les écoulements à surface libre. Ces travaux s'appuient sur la **méthode d'Euler** consistant à mesurer une quantité, en un point fixe et en fonction du temps. Or le transport permanent de la couche supérieure du lit sédimentaire résulte d'une série alternée de sauts et de périodes de repos des grains de sable dépendant des forces hydrodynamiques instantanées et imprévisibles, caractéristiques d'un processus aléatoire. Les traceurs radioactifs, en permettant des mesures lagrangiennes, se révèlent donc très utiles pour déterminer les trajectoires des particules isolées et des groupes de particules tout au long d'un canal. D'autres travaux, également réalisés en canal de laboratoire, établissaient simultanément le débit solide par charriage et le débit solide en suspension. Récemment, des traceurs ont également été utilisés pour l'étude des mécanismes de rejets de produits de dragage en canal. Dans toutes



Détection de radiotraceurs sur grand estran découvrant sur la côte ouest du Cotentin.

ces hypothèses, les traceurs radioactifs démontraient leur rôle prépondérant et, semble-t-il, irremplaçable en raison de leur grande sensibilité de mesure.

Ces nombreuses études plaident en faveur de l'utilisation des traceurs dans la nature, notamment en raison de leurs larges potentialités et de leur souplesse d'utilisation. En effet, l'expérience acquise montre que les différents procédés fournissent une bonne estimation des quantités de sédiments transportés avec, dans le pire des cas, une incertitude se situant entre 50 à 100 %. Pour des mesures en nature, il s'agit d'un bon résultat sachant qu'entre les diverses formules empiriques d'estimation du débit solide à l'équilibre se produit souvent un facteur 10 d'écart et parfois plus! Néanmoins, la



Immersion de radiotraceurs pour l'étude de rejets de produits de dragage.



CEA/DR

Exemple de clapage réalisé par une drague de type Splic-hull dredger.

technique des traceurs reste encore limitée dans l'espace (1 km<sup>2</sup>) et dans le temps (au plus, six mois) mais aussi par l'impossibilité physique de détecter les radionucléides utilisés au-delà d'une profondeur d'enfouissement de 0,8 m. Récemment, à l'occasion d'une étude des rejets de produits de dragages réalisée pour le port de Zeebrugge (Belgique), ces limites ont été largement repoussées à quelques dizaines de km en milieu marin. Naturellement, l'ensemble de ces manipulations demeurent soumises à autorisation de l'**Autorité de sûreté nucléaire (ASN)**.

**Les traceurs non radioactifs**

Tandis que certains d'entre eux existent depuis plusieurs années, certains autres se trouvent en cours de développement :

- les traceurs fluorescents, essentiellement destinés aux particules sableuses, peuvent se détecter sur **estran**, *in situ* ou par prélèvements suivis de mesures en laboratoire ;
- les traceurs radioactifs marquent les sédiments (vases ou sables) au moyen d'un élément activé en réacteur, choisi en fonction des éléments-traces présents, naturellement, sur le site d'étude; les mesures s'opèrent par prélèvement, puis par activation en réacteur et enfin, par analyse de la teneur en élément-traceur dans l'échantillon, selon la méthode de **spectrométrie gamma** bas bruit de fond;
- les traceurs magnétiques, en cours de développement, tant au niveau des traceurs eux-mêmes que des

moyens de détection, permettent d'envisager plusieurs principes : la résonance paramagnétique électronique (RPE), la **susceptibilité magnétique**, le magnétisme total...

- les traceurs marqués par une étiquette **radio-fréquence passive (RFID)** de quelques mm de diamètre concernent uniquement les galets dont la mesure s'effectue directement sur le site (bancs découvrants) au moyen d'une antenne portable.

Les traceurs fluorescents et activables ont été récemment utilisés, conjointement, pour la réalisation d'une étude sur les transferts de solides dans les grands réseaux d'irrigation (Jamrao canal system) au Pakistan (province du Sindh).

**Les capteurs radiométriques ou jauges nucléoniques**

Leur efficacité réside dans l'association optimale d'une source de rayonnement ionisant et d'un détecteur adapté. L'interaction rayonnement/matière examinée permet alors de mesurer, en continu, la concentration ou la densité de sédiments en suspension ou déposés. Cette opération rend possible des mesures non destructives, sans faire de prélèvements, et cela, même à travers une paroi opaque ou directement dans l'eau. Ces informations, traitées en temps réel grâce à un ordinateur, offrent une aide à la décision ou encore à la gestion d'ouvrages et d'une installation.

Les spécialistes distinguent deux types de dispositifs (figure 2). D'abord, les **jauges à transmission** où la source et le détecteur prennent place de part et d'autre de l'échantillon à mesurer ce qui permet d'apprécier le rayonnement ayant traversé la matière. Ensuite, les **jauges à diffusion** où la source et le détecteur se situent du même côté de l'échantillon ; dans ce cas, on s'intéresse au rayonnement ayant diffusé dans la matière. Parmi les différents types de jauges figurent notamment :

- les appareils de terrain plus particulièrement adaptés :
  - aux mesures de turbidité directement *in situ* ou à travers une canalisation ;



CEA/DR

Jauge à transmission JTD3 (à gauche) et jauge à diffusion JTT4 (à droite).

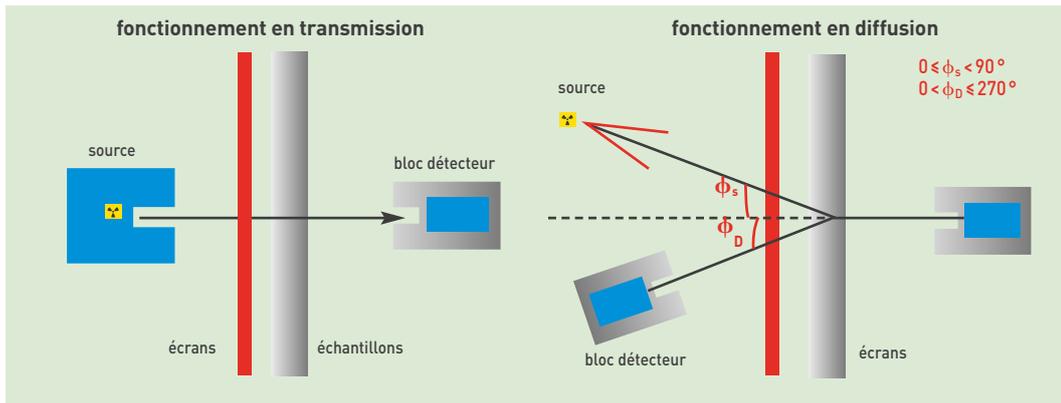


Figure 2.  
Les deux dispositifs de jauge.

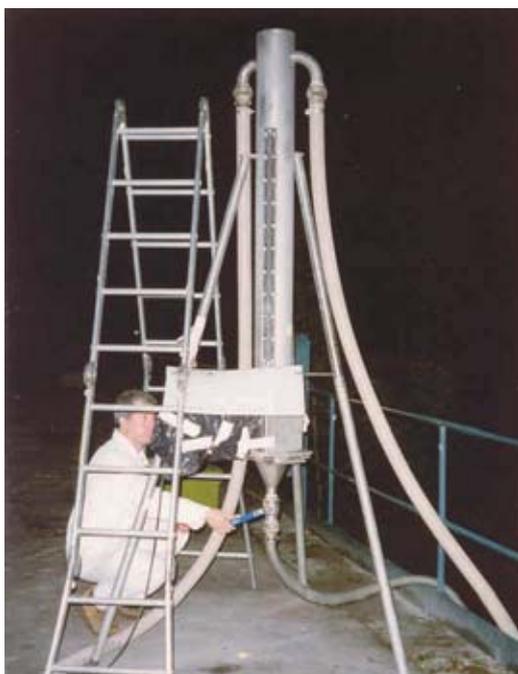
– aux mesures du **profil vertical de densité** des matériaux déposés dans les chenaux envasés, puits de dragage et retenues de barrage. Les informations obtenues, complémentaires de celles fournies par les sondes à **ultrasons** ne localisant que l'interface eau/vase liquide, permettent de repousser la limite des profondeurs navigables. Pour un chenal classique de navigation, il s'agit d'une économie de plusieurs M€ par an ;

– au pilotage des vidanges de retenues de barrages ;

– aux mesures des variations de hauteur de formes sédimentaires et de la direction du transport.

- les appareils de laboratoires spécialisés, d'une part dans les mesures non invasives et non destructives du profil de densité d'une carotte sédimentaire ; d'autre part, dans la mesure du gradient de tassement des sédiments fins en fonction du temps, de la hauteur du culot, de la concentration initiale de la suspension, de la hauteur du volume de sédimentation.

Tous ces dispositifs respectent les normes d'irradiation au contact et leur mise en place requiert une autorisation de l'ASN. Leur conception les rend utilisables par des personnels n'étant pas directement affectés au travail sous rayonnement ionisant. Le plus souvent, la précision de ces appareils s'établit à 1 %



Jauge SERES en position de mesure sur le barrage de Genissiat. CEA/DR

avec un degré de confiance de 68 %. Ils s'avèrent d'autant plus performants et sans concurrents que la concentration devient élevée. Toutefois, en dessous de 1 g/L, d'autres procédés s'imposent.

En conclusion, force est de constater que l'industrie, la navigation, le tourisme tendent parfois à exploiter et à domestiquer, avec plus ou moins de brutalité, les fleuves, les estuaires et le littoral. Le recul des côtes, l'extraction des granulats, les rejets des eaux usées et des produits de dragage, les vidanges de retenues de barrages... figurent au rang de problèmes d'actualité. Leur résolution passe par une connaissance précise des mécanismes de transport, de dilution, de sédimentation, de mesure des paramètres qui régissent ces processus afin de définir la meilleure gestion possible des milieux fluviaux, estuariens et côtiers. Confortés par les résultats de nombreuses études, les traceurs et les jauges nucléoniques demeurent, actuellement, l'un des rares moyens permettant aux ingénieurs, aux hydrauliciens et aux chercheurs de disposer des informations et des mesures indispensables à leurs missions.

Parmi les domaines à fort impact économique et écologique, six d'entre eux devraient voir leur développement se confirmer voire s'intensifier. Il s'agit de :

- la gestion des travaux de dragage dus au rejet des produits de dragage-navigabilité dans les chenaux envasés ;
- la stabilité du littoral confronté à l'action de la houle et des courants sur les transports sédimentaires ainsi que l'extraction en mer de granulats ;
- les rejets urbains et industriels sous forme particulaire dans les estuaires et en mer ;
- les mesures en continu des matières en suspension (MES) ;
- les études pour la gestion des vidanges de retenues de barrage.

Avec l'ouverture des frontières européennes, ces techniques devraient permettre aux ingénieurs français du génie civil en charge des problèmes posés par les transports solides, de pouvoir proposer des procédés originaux, performants et d'avant-garde, comparés à ceux de leurs concurrents dont la plupart ne disposent pas de cet atout complémentaire que sont les traceurs et les jauges nucléoniques.

> **Patrick Brisset**

Laboratoire d'intégration des systèmes  
et des technologies (List)  
Direction de la recherche technologique  
CEA Centre de Saclay