LES DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES

Michel MONNIN,
*Ingénieur E.N.S.C.C.,
Laboratoire de Physique Nucléaire,
Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand
34, avenue Carnot - Clermont-Ferrand - 63*

RÉSUMÉ

Dans ce texte, nous donnons un aperçu général des caractéristiques des détecteurs solides de traces, en insistant plus particulièrement sur les détecteurs organiques (polymères). Tout d'abord nous décrivons le développement par attaque chimique des traces de particules ionisantes. Nous indiquons les réactifs chimiques permettant l'utilisation de nouveaux détecteurs comme le polyéthylène, le polypropylène et le polyéthylène ionomérique ainsi que des méthodes différentes pour la révélation des traces dans des détecteurs déjà connus. Puis, nous décrivons la propriété la plus caractéristique des détecteurs : leur seuil très marqué d'enregistrement et nous suggérons d'en donner une nouvelle définition. Enfin, nous exposons brièvement des mécanismes possibles de formation des traces. Nous concluons en souhaitant un large champ d'application pour ces détecteurs.

ABSTRACT

In this paper, we give a general survey of characteristics of solid-state nuclear track detectors. Organic detectors (polymeric systems) are emphasized. We first describe the development of ionizing particles tracks by chemical etching. We give the chemical etching reagents to be used with new detectors such as polyethylene, polypropylene and ionomeric polyethylene and, also, new methods to reveal some already known detectors. Then, the most important characteristic of detectors, i.e. its very sharp detection cut-off is explained and we suggest to give a different definition of the detection threshold. Finally, we expose briefly possible mechanics for track formation. We conclude expecting a large application for these detectors.

I. — INTRODUCTION

Les détecteurs solides de traces forment une nouvelle classe de détecteurs pour l'étude des trajectoires visualisées des particules chargées. Nous présentons l'ensemble des propriétés des caractéristiques de ces détecteurs qui, par leurs multiples applications tant dans le domaine des hautes que des basses énergies, présentent un intérêt grandissant pour les problèmes de dosimétrie et de radioprotection. Leurs applications sont déjà nombreuses en physique nucléaire, géochronologie, étude du rayonnement cosmique.. Quelques utilisations en dosimétrie ont été tentées.

C'est en étudiant les dommages créés par les fragments de fission de l'Uranium qu'en 1959, SILK et BARNES ⁽¹⁾ ont mis en évidence les premières traces de particules chargées visibles au microscope électronique dans certains réseaux cristallins. C'est le développement par attaque chimique préférentielle, réalisée par PRICE et WALKER (2, 3, 4, 5) qui a attiré l'attention sur le fait qu'un grand nombre de solides isolants pouvaient servir à l'enregistrement des particules chargées puisque les dommages créés pouvaient être amplifiés jusqu'à devenir observables au microscope optique sous l'aspect de véritables « traces ».

II. — DESCRIPTION DES DÉTECTEURS

I. NATURE

On désigne, de façon générale, sous le terme de « détecteurs solides de traces » ("Nuclear solid state track detector") toute substance diélectrique permettant, après une attaque chimique appropriée, l'observation au microscope optique en lumière transmise de la trace laissée par une particule ionisante individuelle. Ces détecteurs appartiennent donc à la famille des détecteurs ionographiques et pourraient s'apparenter aux émulsions nucléaires classiques par l'aspect des traces observables s'ils n'avaient par ailleurs des propriétés et des caractéristiques spéciales qui les en différencient nettement.

Du point de vue de la nature, on peut classer ces nouveaux types de détecteurs en deux catégories. D'une part, les détecteurs minéraux : ce sont des cristaux naturels ou artificiels tels que les micas, l'olivine, le zircon, la tourmaline, ... ou encore des substances à structure plus amorphe tels que les verres. D'autre part, les détecteurs organiques : ce sont des substances artificielles très largement commercialisées pour la plupart : les matières plastiques courantes ou hauts polymères organiques.

Nous porterons spécialement notre attention, dans cet exposé, sur les polymères organiques du fait de leur plus grande facilité d'emploi, leur meilleure sensibilité (*).

2. MÉTHODE DE DÉVELOPPEMENT DES TRACES

Lorsqu'une particule chargée pénètre à l'intérieur d'une masse solide, elle cède tout ou partie de son énergie, laquelle permet l'apparition de phénomènes souvent nombreux et complexes. Dans tous les cas, la matière cible est perturbée et dans le cas des détecteurs isolants, ces perturbations conduisent à une dégradation de la matière. Il existe donc tout autour de la trajectoire de la particule une zone où les propriétés initiales de la substance considérée ont subi des changements. En particulier, la réactivité chimique vis-à-vis d'un ou de plusieurs composés agressifs peut être accrue, dans de très notables proportions. On conçoit aisément que, dans de telles conditions, lorsque le détecteur est plongé dans une solution chimique convenable, la zone entourant la trajectoire soit attaquée plus rapidement que la masse environnante. Lorsque la cavité ainsi creusée atteint des dimensions comparables aux longueurs d'onde de la lumière visible, elle

* Le lecteur plus particulièrement intéressé par les enregistrements de traces dans les minéraux lira avec intérêt les articles cités en référence (6, 7, 8, 3, 10, 11).

joue le rôle de centre de diffusion pour la lumière transmise. La trace apparaît alors noire sur fond clair ou brillante sur fond sombre selon le mode d'observation.

3. CONDITIONS NÉCESSAIRES DE DÉVELOPPEMENT

Nous avons dit que l'attaque chimique dans la zone perturbée est plus rapide que dans la masse environnante. Pour qu'une telle attaque puisse se manifester, encore faut-il que cette zone soit accessible à l'agent agressif. Il est donc impérieux que la zone de dommage créée prenne naissance à la surface même du détecteur. Une particule chargée dont l'intégralité de la trajectoire, origine comprise, se trouve dans la masse du détecteur ne donnera pas naissance à une trace *développable* sauf si la perméabilité de la matière vis-à-vis de l'agent agressif est grande. Ce n'est généralement pas le cas.

On peut traduire les différentes « réactivités » en terme de vitesse (exprimées par exemple en microns/mn). On définit alors deux vitesses qui sont, d'une part, la vitesse de déplacement V_1 du front d'attaque perpendiculairement à la surface du détecteur, et, d'autre part, la vitesse de déplacement V_2 du front d'attaque le long de la trajectoire de la particule. Pour qu'une trajectoire de particule pénétrant perpendiculairement à la surface du détecteur soit révélabile il faut que la condition $V_2 > V_1$ soit remplie.

FIG. 1. — Schéma du processus de développement chimique.
On a pris $V_2 = 3 V_1$. S_0, S_1, S_2, S_3 représentent la surface du détecteur.

La figure 1 montre schématiquement les divers stades de la formation des traces. On voit que le détecteur est « grignoté » en surface, tandis que, dans le même temps, le long de la trajectoire de la particule, la matière disparaît rapidement. On notera que le diamètre de la trace croît également : il y a en effet une attaque radiale de la matière à partir du centre de la zone dégradée.

Lorsque la particule ionisante a pénétré dans le détecteur sous un angle d'incidence θ la condition $V_2 > V_1$ n'est pas suffisante. Il apparaît un angle limite d'enregistrement $\theta_1 = \arccos \frac{V_1}{V_2}$ (12) (Figure 2).

FIG. 2. — Angle limite d'enregistrement.

En effet, si $\theta > \theta_1$, la masse de détecteur environnant la trace potentielle disparaît avant même que ne se forme la trace. Cet effet est général. C'est ainsi, par exemple, que les particules alpha ne sont plus enregistrées dans le nitrate de cellulose sous un angle d'incidence supérieur à 55° (13). Précisons cependant que ce détecteur est celui où l'effet d'incidence est le plus grand. Donnons, à titre d'exemple, les valeurs de $V_1 = 0,01 \mu/\text{mn}$ et $V_2 = 0,8 \mu/\text{mn}$ que nous avons mesurées dans le polycarbonate de 44' diphényldioxy 22 propane (Lexan, Makrofol). L'angle limite d'enregistrement est alors $\sim 89^\circ$. On peut raisonnablement dire que l'enregistrement devient indépendant de l'angle d'incidence.

4. CONDITIONS DE TEMPÉRATURE ET CONCENTRATION DU RÉACTIF ET DE TEMPS D'ATTAQUE

En principe, lorsqu'on a trouvé expérimentalement un réactif chimique permettant de révéler, dans des conditions données de température, de temps et de concentration, la trajectoire d'une particule chargée, on peut, à loisir, faire varier ces paramètres pour atteindre le même résultat. Tous les auteurs ont constaté que l'augmentation de la température permettait d'obtenir les traces plus rapidement : il en va de même avec l'augmentation de la concentration du réactif. Toutefois, l'examen détaillé des différentes traces obtenues pour des particules identiques, en faisant varier ces paramètres, montre que l'identité des résultats n'est pas parfaite. Les traces obtenues à températures plus basses ont des contours plus précis que si le développement est conduit à chaud (10). De même, le bruit de fond, quasiment nul en général peut être notablement accru si les conditions d'attaque sont plus sévères. On comprendra ces différences si l'on sait que les fonctions régissant les variations de V_1 et V_2 ne sont pas identiques. Selon le cas, on est conduit

à choisir des conditions de développement en fonction du but poursuivi. Si, par exemple, on désire dénombrer rapidement les traces enregistrées sur une certaine surface de détecteur, on fera un développement à chaud et avec une forte concentration de réactif. Si, par contre, on désire étudier les interactions possibles de la particules avec les noyaux du détecteur on conduira le développement avec davantage de précautions. Ces détecteurs montrent là l'un des aspects de leur souplesse d'emploi.

Néanmoins, le jeu des températures d'attaque n'est pas absolument libre. Nous avons constaté en effet que, notamment pour les détecteurs appartenant à la famille des polymères vrais, il était d'autant plus facile d'obtenir des traces que la température de développement était proche du premier point de transition de verre. Si la température est notablement plus basse, il est quelquefois quasi impossible d'obtenir un résultat. Il reste toujours la possibilité de faire varier les concentrations.

L'étude de l'apparition des traces dans les minéraux a conduit MAURETTE à considérer l'effet d'une agitation ultra-sonique en cours de développement (7). Ses résultats montrent que la vitesse d'apparition pouvait être accrue d'un facteur 3. Les mêmes constatations ont été faites par DEBEAUVAIS dans les polymères organiques (14).

5. LES DIVERS DÉTECTEURS ORGANIQUES

Nous donnons maintenant la liste des détecteurs organiques susceptibles d'être utilisés pour l'enregistrement des particules individuelles. On notera avec intérêt qu'ils sont tous produits commercialement et sous des formes les plus diverses. Le premier signalé de ces polymères organiques est le polycarbonate (LEXAN, MAKROFOL) (15). Il reste, à ce jour encore, le mieux connu. On vit apparaître ensuite le Mylar et les détecteurs de la famille cellulosique : nitrate, acétate, acétobutyrate (13, 15, 16, 17). Les caractéristiques du polytéréphtalate isophtalique d'hydroquinone diphénol (HB paIT) étaient données par FLEISCHER et al. (18), celle du « film H » par PERELYGIN (19). Puis, MONNIN et al. donnaient les modes de développement des phénoplastes formophénoliques (ambrolithe, bakélite) (20). On remarquera que tous ces hauts polymères organiques sont obtenus à partir de deux composés bifonctionnels par copulation. Ce sont tous des polycondensats. Nous avons pu obtenir des traces dans des polymères vrais (20, 21), polyméthacrylate de méthyle (plexiglass), polyoxyméthylène (Delrin), polystyrène et chlorure de polyvinyle *. Il ne semble donc pas que le mode de constitution de la macromolécule à partir de ses constituants primaires puisse lui interdire d'être utilisée à des fins de détection. Nous avons pu mettre au point les techniques de révélation des fragments de fission dans trois autres polymères vrais : le polypropylène (Moplen), le polyéthylène basse densité et le polyéthylène ionomérique (surlin). Par ailleurs, nous avons déterminé des modes de développement différents de ceux déjà connus pour le polycarbonate, le polytéréphtalate d'éthylène glycol, le nitrate de cellulose, le phénoplaste formophénolique et le polystyrène. Comme on le constate, le nombre des détecteurs solides de traces

* Le polyméthacrylate de méthyle avait été signalé par FLEISCHER (15) mais ne fut pas confirmé par la suite. La méthode proposée ne semble pas donner de résultats.

est d'ores et déjà suffisamment grand pour autoriser un choix de la part de l'utilisateur en fonction de chaque problème spécifique.

6. LES DÉTECTEURS ET LEURS RÉACTIFS DE DÉVELOPPEMENT

— polycarbonate	1) NaOH
	2) $K_2Cr_2O_7$ en milieu acide
— polytéréphthalate	1) NaOH
	2) $KMnO_4$
— dérivés cellulosiques	NaOH
— nitrate de cellulose	1) NaOH
	2) $K_2Cr_2O_7$ en milieu acide
— HBpaIT	NaOH
— Film H	NaOH
— phénoplaste	1) développement séquentiel
	NaOH puis HF
	2) $K_2Cr_2O_7$
— polyoxyméthylène	$KMnO_4$
— polyméthacrylate	$KMnO_4$
— chlorure de polyvinyle	$KMnO_4$
— polystyrène	1) $KMnO_4$
	2) $K_2Cr_2O_7$
— polypropylène	$K_2Cr_2O_7$ en milieu acide
— polyéthylène	$K_2Cr_2O_7$ en milieu acide
— surlyn	$K_2Cr_2O_7$ en milieu acide

III. — CARACTÉRISTIQUES DES TRACES

1. GÉOMÉTRIE DES TRACES

Le diamètre de la trace primaire, c'est-à-dire avant attaque chimique, est très mal connu. On s'accorde en général à admettre pour diamètre du « cœur » très perturbé de la trace primaire la valeur 50 Å (22, 23, 8). Mais il faut bien voir que la zone endommagée n'a pas avec la matière environnante une frontière nettement marquée : la densité de dommages diminue avec la distance à l'axe de la trace. On a pu observer au microscope électronique les traces primaires laissées par des fragments de fission dans des polymères organiques (24, 25), traces dont les diamètres sont de quelques centaines d'angströms.

Bien entendu, la longueur des traces est essentiellement fonction de la nature et de l'énergie de la particule enregistrée.

2. STABILITÉ DES TRACES

Contrairement aux émulsions nucléaires les détecteurs solides de traces sont capables de conserver à température ambiante l'empreinte des particules enregistrées indépendamment du temps écoulé entre l'irradiation et le développement, même après plusieurs années !

Toutefois, le stockage à chaud de ces détecteurs peut entraîner une cicatrisation plus ou moins marquée. C'est notamment le cas pour les micas (6, 8, 26). Un recuit de 900 °C pendant 80 mn du mica interdit la révélation des traces (8) bien que celles-ci restent encore visibles au microscope électronique. De façon générale, les recuits thermiques de minéraux entraînent un effacement plus ou moins total des traces (27). Il en va de même pour les polymères organiques. Mais les températures correspondantes sont notablement plus faibles. Après une centaine d'heures à la température de 100 °C, le nombre de traces révélées dans du nitrate de cellulose par rapport à une plaque témoin est réduit de 33 % (28). Un effet similaire est obtenu avec le lexan à partir de 185 °C (10). Les températures d'« effacement » sont, on le voit, suffisamment élevées pour n'être pas dans la majorité des cas un obstacle à l'emploi de ces détecteurs.

Rappelons que le point de fusion des émulsions nucléaires est de l'ordre de 50 °C.

L'effet de pressions hydrostatiques élevées est négligeable.

3. EFFET DES PARAMÈTRES EXTÉRIEURS

On a pu constater que l'enregistrement des traces dans les nitrates et acéto-butyrates de cellulose était fortement modifié par les conditions extérieures au cours de l'irradiation (10). En l'absence d'oxygène ou sous un vide poussé l'enregistrement est détectueux : le temps nécessaire à la révélation des traces est plus long. De même, nous avons trouvé que, pour le Makrofol, les traces de fragments de fission enregistrées sous vide n'apparaissent qu'après un développement de 40 mn alors que, dans les mêmes conditions, elles apparaissent après 25 mn pour une irradiation aérienne (20). Nous verrons comment ces différences peuvent être reliées à certaines hypothèses sur le mécanisme de formation des traces.

L'irradiation uniforme du détecteur par des rayonnements électromagnétiques ou des particules chargées de perte d'énergie trop faible a très peu d'influence. C'est ainsi que ces détecteurs peuvent absorber des doses énormes de rayonnement sans en être affectés : une dose de 10^{10} rads en électrons est sans influence, un flux de 10^{12} protons/cm² ne modifie pas l'enregistrement.

IV. — SENSIBILITÉ DES DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES

Nous abordons là l'une des caractéristiques essentielles de ce type de détecteurs : ce sont des détecteurs à seuil. Dès les premières publications sur le sujet (WALKER (6)), il a été mis en évidence que les détecteurs solides de traces tant d'origine minérale qu'organique n'enregistraient que les particules dont la perte d'énergie par unité de longueur $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ dépassait une valeur critique : le seuil d'enregistrement. Certes, cette caractéristique est commune aux procédés classiques d'enregistrement de traces. Mais, pour les détecteurs solides de traces, la bande des valeurs de $\frac{dE}{dx}$, où l'enregistrement est médiocre, est particulièrement étroite au point que l'on puisse donner pour chaque détecteur une valeur seuil de $\frac{dE}{dx}$.

1. SEUIL

La courbe ci-dessous (Fig. 3) montre l'évolution de la perte d'énergie linéaire de 2 ions A et B dans un détecteur. La valeur $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{seuil}}$ indique le taux minimum de perte linéaire d'énergie que doit avoir une particule chargée dans ce détecteur pour être enregistrée. Au-dessous de cette valeur, aucune trace n'est révétable, au-dessus elles le sont toutes. Si, comme pour l'ion A, la courbe descend en dessous de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{seuil}}$ à partir de l'énergie E_1 jusqu'à l'énergie E_2 , les ions A d'énergie comprise entre E_1 et E_2 ne seront pas enregistrés. Par contre, les ions B seront totalement enregistrés quelle que soit leur énergie. En fait, du côté des très basses énergies, la courbe décroît très rapidement jusqu'à la valeur 0 : la partie ultime de la trajectoire n'est pas enregistrée. Il manquera, dans la plupart des cas, une petite fraction de micron à la longueur théoriquement attendue.

Ainsi, dans un tel détecteur, un ion Si d'énergie inférieure à 2,8 MeV/nucléon soit ~ 78 MeV sera enregistré alors qu'un ion S le sera pour une énergie de 147 MeV. Bien évidemment, les traces obtenues pour ces deux ions aux énergies considérées seront de longueurs sensiblement différentes.

FIG. 3. — Variations de la perte d'énergie linéaire en fonction de l'énergie. Seuil d'enregistrement.

2. COURBES DE PERTE D'ÉNERGIE DES IONS DANS LES SOLIDES

La forme des courbes traduisant la perte d'énergie des ions dans un solide en fonction de l'énergie des ions est unique. On voit sur la figure 4 la famille des courbes $\left(\frac{dE}{dx}\right) = f(E)$ pour différents ions, dans un polymère organique. Ces courbes sont obtenues en pondérant les valeurs de $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ dans les divers constituants atomiques de la macromolécule. Cependant, les polymères organiques

étant constitués d'éléments voisins légers, les courbes de pertes d'énergie d'un polymère à l'autre sont très proches.

FIG. 4. — Pertes d'énergie linéaire de divers ions lourds dans un détecteur solide de traces.

3. SENSIBILITÉ DES DIFFÉRENTS DÉTECTEURS

On a pris l'habitude de préciser la sensibilité des différents détecteurs en donnant la valeur $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{seuil}}$ mais aussi en indiquant la plus légère particule enregistrable, dans des conditions données de développement des traces. Le polycarbonate et le polytéraphthalate ayant un seuil d'enregistrement de l'ordre de $4 \text{ MeV.mg}^{-1}.\text{cm}^2$ sont en mesure de détecter des ions C et O. A notre connaissance, les premières photographies de traces de particules alpha signalées par PRICE dans le nitrate de cellulose ont été publiées par DEBEAUVAIS (13). Depuis, la liste des détecteurs sensibles aux alpha, s'est allongée. On y trouve les dérivés acétate et acétobutyrate de cellulose, le polyméthacrylate de méthyle, le polyoxyméthylène (16, 20, 21). Il semble que le plus sensible des détecteurs actuels reste le nitrate de cellulose dans lequel WALKER a pu observer des traces dues aux deutons (10). Toutefois il est bon de préciser que de récentes expériences en augmentant la puissance du développement ont permis d'enregistrer dans le polycarbonate des particules

alpha (29). Il convient donc en donnant le seuil de détection de préciser nettement les conditions de l'attaque chimique. Il est aisé de constater que selon la masse des particules les traces « se révèlent » plus ou moins vite ; une étude dans ce sens a été faite au microscope électronique (33). Ces différences sensibles dans les temps d'apparition ouvrent une voie nouvelle dans l'utilisation de ces détecteurs, notamment en spectrométrie. Nous n'avons pu encore mesurer expérimentalement les seuils de détection des derniers détecteurs que nous avons mis en œuvre. Des irradiations par ions lourds sont actuellement prévues à cet effet. Nous pensons qu'il conviendra désormais de définir le seuil d'enregistrement des détecteurs en fonction de la plus légère particule enregistrable dans les conditions de développement les plus puissantes. On pourrait croire que ces derniers résultats sont en contradiction avec notre première affirmation, dans cet exposé, selon laquelle la valeur $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{seuil}}$ est précisément fixée. Cela reste absolument vrai dans des conditions de température, de concentration du réactif et de temps d'attaque données avec précision. Mais l'expérimentateur utilisateur de ces détecteurs reste maître de ces conditions et, selon le choix qu'il aura fait des conditions de développement il pourra, à sa convenance, fixer le seuil d'enregistrement de son détecteur. A titre d'exemple, supposons que le but poursuivi soit l'étude de la fission par des ions lourds. En révélant les traces dans des conditions d'attaque ménagée, on pourra ne mettre en évidence que celles qui sont dues aux fragments de fission en évitant ainsi le bruit de fond des particules projectiles. Si, par contre on désire étudier la diffusion des mêmes ions par les noyaux constitutifs, en procédant à un développement plus puissant, on abaisse la valeur de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{seuil}}$ et toutes les traces deviennent visibles. Il n'est pas besoin d'insister davantage sur la souplesse d'emploi de l'instrument mis à la disposition des chercheurs.

V. — LE MÉCANISME DE FORMATION DES TRACES

Depuis que l'étude des détecteurs solides de traces a été entreprise, les divers auteurs se sont efforcés d'interpréter les résultats obtenus en adoptant un mécanisme physico-chimique de la formation des traces. Nous n'entrerons pas dans la détail du processus de BRINKMAN ni dans celui dit des « pointes thermiques ». On a montré en effet qu'ils ne pouvaient valablement rendre compte de la formation des traces.

I. LE MÉCANISME DE L'EXPLOSION IONIQUE (Ion Explosion Spike)

Ce mécanisme, proposé par WALKER (18), est en mesure de rendre compte de la formation des traces plus particulièrement dans les détecteurs minéraux. Selon WALKER, le passage de la particule chargée provoque l'apparition le long de la trajectoire d'ions positifs. Ceux-ci se repoussent mutuellement et vont occuper des positions réticulaires intermédiaires. La ligne de dommages continue

PHOTOS DE TRACES

prises au microscope électronique

1 - Fragment de photofission de l'Uranium entré en collision avec un noyau du détecteur.

2 - Fragments de fission dans du polycarbonate.

3 - Fragments de fission dans du polytéréphthalate.

4 - Fragments de fission dans du polystyrène.

20 μ

5 - Fragments de fission dans du polyméthacrylate de méthyle.

6 - Fragments de fission dans du chlorure de polyvinyle.

7 - Fragments de fission dans de l'acétate de cellulose.

8 - Fragments de fission dans du polyoxyméthylène.

20 μ

- a -

- b -

Traces de fragments de fission dans le nitrate de cellulose - a) révélées à la soude - b) révélées au bichromate de potassium.

- a -

Traces dans le Surlyn

- b -

a) fragments de fission
b) ions « iode ».

20 μ

Fragments de fission

Particules α

ion oxygène
Microscope électronique - Traces légèrement attaquées

1 μ

Nitrate de cellulose

Polyméthacrylate de méthyle

Polycarbonate

Traces de particules α dans divers matériaux

nécessaire au développement chimique est créée. L'auteur a pu relier les propriétés macroscopiques de la substance détectrice aux caractéristiques du détecteur. En particulier, la constante diélectrique, le module d'YOUNG sont des paramètres que l'on peut mettre en corrélation avec la structure des traces. Qui plus est, le modèle proposé est en bon accord avec les valeurs des seuils de détection déterminées expérimentalement. Mais, si le modèle est satisfaisant pour expliquer l'enregistrement des ions lourds dans les polymères organiques, de l'avis même de l'auteur, il ne peut rendre compte de l'enregistrement des particules alpha.

2. MÉCANISME « DELTA »

Nous avons nous-mêmes proposé (30, 20) de rendre compte de la formation des traces par l'émission, le long de la trajectoire de la particule, d'électrons delta. Or, sous irradiation électronique uniforme les polymères organiques peuvent subir soit des dégradations intracaténaïres, soit des réticulations intercaténaïres, soit encore les deux types de transformation simultanément (32). Dans la mesure où le polymère détecteur est du type dégradable, on conçoit que les électrons delta puissent provoquer cette dépolymérisation qui autorise une réactivité chimique accrue. D'après nous, les ions formés par les électrons delta entrent en réaction pour donner naissance à des radicaux libres lesquels conduisent à la dégradation, par l'intermédiaire de réactions radicalaires. Nous avons pu montrer que le nombre de radicaux libres formés, dans le cas des traces de fragments de fission, correspond à l'énergie moyenne de ces fragments. De plus, on sait (31) que le nombre G (nombre de scissions pour 100 eV absorbés dans le cas d'une irradiation uniforme en électrons) peut varier selon que l'irradiation est effectuée sous vide ou sous oxygène. Pour le polycarbonate, ces valeurs sont respectivement de 0,09 et 0,14. De fait nous avons trouvé (Cf. III, 3) que les vitesses d'apparition des traces étaient sensiblement différentes. Les calculs menés sur la base de l'hypothèse des rayons delta (22) sont compatibles avec certains résultats expérimentaux. Mais, ainsi que l'a montré MAURETTE (22) le mécanisme d'endommagement par rayons delta ne peut à lui seul expliquer la formation des traces dans les polymères organiques. En particulier, le fait que nous ayons pu enregistrer des traces dans le polystyrène, polymère particulièrement insensible aux irradiations électroniques uniformes, semble montrer que très probablement, plusieurs effets puissent se superposer pour donner naissance aux traces développables : certains d'entre eux pouvant devenir prépondérants selon la vitesse de la particule. De très nombreux points restent à éclaircir pour élucider totalement ce phénomène intéressant qu'est l'enregistrement des particules chargées par les diélectriques organiques.

VI. — CONCLUSION

Nous avons donné un aperçu des propriétés des détecteurs nucléaires de traces à l'état solide. Bien que d'existence récente, ces détecteurs sont susceptibles d'utilisations intéressantes pour l'étude de nombre de problèmes spécifiques. La facilité de leur manipulation, leurs dimensions variables à loisir, leur souplesse d'emploi sont à notre avis autant de raisons qui militent en faveur de leur étude

pour en faire un instrument de recherche encore mieux adapté aux besoins actuels.

Remerciements. — Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre reconnaissance à la Direction des Recherches et Moyens d'Essais qui nous a efficacement apporté son soutien matériel. Nous remercions Mme DEBEAUVAIS qui a bien voulu nous autoriser à publier des photos de traces prises au microscope électronique au Centre de Recherches Nucléaires, Département de Physique Corpusculaire de Strasbourg.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) SILK E.C.H., BARNES R.S. — Examination of fission fragment tracks with an electron microscope, *Phil. Mag.* **4**, 970, 1959.
- (2) PRICE P.B., WALKER R.M. — *Phys. Rev. Letters*, **8**, 217, 1962.
- (3) PRICE P.B., WALKER R.M. — Chemical Etching of Charged Particles tracks in solid. *J. Appl. Phys.*, **33**, 3407-3412, 1962.
- (4) PRICE P.B., WALKER R.M. — A new track detector for heavy particules studies, **3**, 113, 1962.
- (5) FLEISCHER R.L., PRICE P.B. — Report N 63 RL 3 266 M. General Electric Research Laboratory. *Schenectady*. NY.
- (6) WALKER R.M. — Characteristics and applications of solid state track detectors. Réunion de travail sur l'enregistrement des traces de particules dans les cristaux. *Strasbourg*. Mai 1963.
- (7) MAURETTE M. — Etude d'ions lourds dans les minéraux naturels. *Thèses Paris*. 1965.
- (8) PRICE P.B., WALKER R.M. — Observation of charged particles tracks in solids. *J. of Appl. Physics*. **33**, 3 400-3 406, 1962.
- (9) DEBEAUVAIS M., MULLER C., REBSTEIN E. — Observation de traces de fission de l'uranium au microscope électronique dans du mica et de la molybdénite. *J. Microscopique*, **3**, 153-158, 1964.
- (10) FLEISCHER R.L., PRICE P.B., WALKER R.M., — Solid-state track detectors : Application to nuclear science and Geophysics. *Annual Review of Nuclear Science*, **15**, 1-26, 1965.
- (11) PRICE P.B., WALKER — *J. of Appl. Physics*, **34** 9, 2 903, 1963.
- (12) FLEISCHER R.L., PRICE P.B. — *Geophys. Res.*, **69**, 331, 1964.
- (13) DEBEAUVAIS M., CUER P. — Enregistrement des traces de particules alpha de faible énergie dans des films de nitrate de cellulose. *Compt. Rend.*, **258**, 1 777-8, 1964.
- (14) DEBEAUVAIS M. — Communication personnelle.
- (15) FLEISCHER R.L., PRICE P.B. — Tracks of charged particles in high polymers, *Science*, **140**, 1 221-2, 1963.
- (16) FLEISCHER R.L., PRICE P.B., WALKER R.M. — Track registration in various solid-state detectors, **133 A** 1 443, 1964.
- (17) DEBEAUVAIS M., MONNIN M. — Détermination des seuils de sensibilité d'enregistrement de différentes particules ionisantes dans des polymères à l'état solide. *Compt. Rend.*, **260** 4 728-30, 1965.
- (18) FLEISCHER R.L., PRICE P.B., WALKER R.M. — *J. of Appl. Phys.*, **36**, 3 645-51, 1965.
- (19) PERELYGIN V.P. — Communication personnelle, *VI^e Conf. Intern. de Photog. Corp.*, Florence, 1966.
- (20) MONNIN M., BESSON H., SANZELLE S. — Mécanisme de formation et de développement des traces de particules ionisantes dans les polymères organiques. *VI^e Conf. Intern. de Photog. Corp.*, Florence, 1966.
- (21) MONNIN M., BESSON H., SANZELLE S., AVAN L. — Quelques nouveaux détecteurs ionographiques de la famille des détecteurs solides de traces. *Compt. Rend.*, **263**, 1 337, 1966.
- (22) MAURETTE M. — Enregistrement des trajectoires de fragments de fission dans quelques substances isolantes. *J. de Physique*, **27**, 505-12, 1966.
- (23) BEAN C.P., DOYLE M.V., ENTIRE G. — Report General Electric Research Laboratory *Schenectady*, N.Y.
- (24) MALMON A.G. — *J. of Appl. Phys.*, **B 4**, 3 634-35, 1963.

- (25) FIEDLER G., KALKBRENNER. — Electron microscopic observation of U-fission fragments tracks, *VI^e Conf. Intern. of Photog. Corp.*, Florence, 1966.
- (26) MAURETTE M., PELLAS P., WALKER R.M. — *Bull. Soc. Franç. Minér. Crist.*, **87**, 6, 1964.
- (27) KAPUSCIK A., PERELYGIN V.P., TRETIKOVA S.P., SHADIEVA N.H. — The annealing behaviour of fission fragment tracks and A-ions tracks in muscovite mica.
- (28) DEBEAUVAIS M. — Enregistrement de traces dans divers matériaux, *V^e Conf. Intern. of Photog. Corp.*, Genève, 1964.
- (29) J.W.N. TUYN. — Institutt for Atom energi. Nota Lab Memo n° 124.
- (30) PFOHL R., MONNIN M., DEBEAUVAIS M. — Comparaison de l'enregistrement des traces d'ions lourds dans les émulsions ionographiques et dans divers matériaux solides. *Compt. Rend.*, **261**, 2 216-18, 1965.
- (31) GOLDEN J.H., HAZZEL E.A. — Degradation of polycarbonate by ionizing radiation. *J. of Polymer Science, A*, **1** 671, 1963.
- (32) BESSON H., D.E.A., Clermont-Ferrand, 1966.
- (33) TRIPIER J., MULLER M., DEBEAUVAIS M., STEIN R., RALARGY J., REMY G., MOSINSKI G. — Contribution to methodological study of ionographic plastic detectors. Sous presse.