LES DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES

D. BLANC

(Manuscrit reçu le 13 mars 1970)

PLAN

I - INTÉRÊT DE LA QUESTION

II - HISTORIQUE DE LA QUESTION

III - ÉTUDE DE LA TRACE LATENTE

- CONDITION DE FORMATION DE LA TRACE LATENTE.
- OBSERVATION DE LA TRACE LATENTE : MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE.
- OBSERVATION DE LA TRACE LATENTE : DIFFRACTION DE RAYONS X.
- STABILITÉ DE LA TRACE LATENTE.

1° Temps de stockage du matériau.

2° Nature du milieu ambiant.

3° Température.

a) Températures élevées.

b) Basses températures.

c) Mécanisme.

4° Pression.

5° Rayonnement ultraviolet

IV - OPÉRATION DE DÉVELOPPEMENT - PROPRIÉTÉS DE LA TRACE DÉVELOPPÉE

- TECHNOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE LA TRACE LATENTE.

1° Micas divers.

2° Matériaux du type « verres ».

3° Cas particulier des composés minéraux contenant de l'argent : décoration des traces.

4° Matières plastiques.

a) Développement par action chimique.

b) Développement par dissolution.

- CONDITIONS A REMPLIR POUR QUE LA TRACE SOIT DÉVELOPPABLE

1° Rôle de la surface du détecteur.

2° Ionisation créée par la particule.

- a) Transfert linéique d'énergie instantané de la particule.
- b) Ionisation spécifique de la particule.
- c) Valeur de l'efficacité de détection.
- d) Angle d'incidence de la particule.

— VITESSE V D'ATTAQUE LE LONG DE LA TRAJECTOIRE.

- 1° Forme de la trace développée.
- 2° Variation de V avec la nature de la particule.
- 3° Variation du rapport $R = v/V$ en fonction de paramètres extérieurs.
 - a) Paramètres chimiques.
 - Concentration du réactif.
 - Température.
 - Atmosphère lors du développement.
 - b) Paramètres physiques.
 - Etincelle électrique.
 - Rayonnement U.V.
 - Brassage par ultra-sons.

V. - DÉPOUILLEMENT DES DONNÉES APRÈS LE DÉVELOPPEMENT

— COMPTAGE DES TRACES DÉVELOPPÉES.

- 1° Microscopie optique.
 - a) Emploi habituel.
 - b) Emploi d'un composé fluorescent.
 - c) Emploi d'un scintillateur.
 - d) Contraste par interférences.
 - e) Emploi de lumière polarisée.
- 2° Densitométrie optique.
- 3° Mesure de la résistance de l'échantillon.
- 4° Marquage sur des matières plastiques métallisées.
- 5° Marquage coloré des traces.
- 6° Marquage radioactif des traces.
- 7° Marquage électrique des traces.

— SPECTROMÉTRIE DES PARTICULES.

- 1° Effacement du bruit de fond.
- 2° Mesure de la charge Z du projectile.
- 3° Mesure de la charge et de la masse de particules pénétrantes.
- 4° Cas de particules de faible parcours.

VI - MÉCANISME DE LA FORMATION DES TRACES
ET DE LEUR DÉVELOPPEMENT

— HYPOTHÈSE DE LA POINTE THERMIQUE.

- 1° Pointe thermique sphérique.
 - a) Choc sans déplacement d'atome.
 - b) Choc avec déplacement.
- 2° Pointe thermique cylindrique.
- 3° Validité de cette hypothèse.

— HYPOTHÈSE DE LA POINTE DE DÉPLACEMENT.

- 1° Hypothèse de BRINKMAN.
- 2° Validité de cette hypothèse.

— HYPOTHÈSE DE LA POINTE D'EXPLOSION IONIQUE.

- Première condition.
- Seconde condition.
- Troisième condition.
- Quatrième condition.
- Validité de cette hypothèse.

— CAS DES MATIÈRES PLASTIQUES. RÔLE JOUÉ PAR LES RAYONS δ .

- 1° Succession des phénomènes.
 - a) Absorption de l'énergie.
 - b) Etablissement de l'équilibre thermique.
 - c) Etablissement de l'équilibre chimique.
- 2° Rôle joué par les rayons δ .
- 3° Généralisation du mécanisme δ à tous les types de détecteurs.

VII - APPLICATIONS PRATIQUES DES DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES

— MESURE D'INTERVALLES DE TEMPS.

- 1° Périodes de fission spontanée.
 - a) Période de fission spontanée de l'uranium 238.
 - b) Période de fission spontanée de l'isotope 260 de l'élément 104.
- 2° Durées de vie très courtes.

— ETUDE DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES.

- 1° Réactions de fission et de spallation.
 - a) Fissions induites par des neutrons.
 - b) Fissions et spallations induites par des protons.
 - Fissions de métaux de masses moyennes et élevées.
 - Etude à la limite inférieure des masses possibles.
 - Irradiation de lames de mica.
 - c) Fissions produites par des noyaux plus lourds.
 - d) Photofissions.
- 2° Autres réactions nucléaires.

— RAYONNEMENT COSMIQUE.

— MICROANALYSE - DOSAGES DIVERS.

- 1° Dosages du radon et du thoron.
- 2° Micro-dosages de l'uranium et du thorium dans les cristaux naturels.
- 3° Taux d'enrichissement en ^{235}U de l'uranium métallique.

— RADIOPROTECTION.

- 1° Radioprotection spatiale.
- 2° Détection des neutrons. Leur dosimétrie.
 - a) Introduction.

- b) Préparation des échantillons.
- c) Neutrons thermiques.
- d) Neutrons intermédiaires, neutrons rapides.
- e) Exemples de réalisations pratiques.
 - Dosimètre de FLEISCHER, PRICE et WALKER.
 - Dosimètre plastique de BAUMGARTNER.
 - Détecteurs à seuil.
 - Verres dosimètres.
- f) Conclusions.

— GÉOCHRONOLOGIE - ASTROPHYSIQUE.

- 1° Procédés de détection des composés minéraux.
 - a) Datation par irradiation neutronique.
 - b) Datation par désintégrations radioactives.
- 2° Etude des traces induites par les rayons cosmiques dans les minéraux d'origine extraterrestre.
 - a) Cas des météorites.
 - b) Cas des roches lunaires.

— CRISTALLOGRAPHIE.

— PHYSIQUE DES AÉROSOLS.

VIII - CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

Le texte que je présente ici constitue un chapitre d'un cours de 3^e Cycle professé devant les étudiants de l'Université de Toulouse*. Il a le caractère d'une mise au point bibliographique, mais où des préoccupations d'ordre pédagogique sont constamment présentes.

Je pense qu'il sera utile aux radioprotectionnistes, mais aussi à tous ceux qui s'intéressent à la détection des particules et à ses applications dans les divers domaines des sciences.

Le point de départ de ce travail est le diplôme d'études supérieures soutenu, à Toulouse, en 1968, par J. J. THOMAS. Le travail de THOMAS [Th-1] a été complété par M. TEYSSIER, Maître de conférences à l'Université de Limoges et par Mme CHAPUIS et M. FRANÇOIS, Ingénieurs au Service Technique d'Etudes de protection du C.E.A., pour former un rapport plus complet [Th-2].

Mon texte s'inspire beaucoup de ces deux rapports. Il les complète, et comporte les enseignements nombreux acquis lors du dernier congrès sur les détecteurs solides de traces, qui s'est déroulé à l'Université de Clermont-Ferrand, du 6 au 9 mai 1969.

I - INTRODUCTION : INTÉRÊT DE LA QUESTION

Le 20^e siècle est celui de l'électronique. Cette technique a bouleversé tous les domaines de l'activité humaine. La détection des particules n'échappe pas à cette loi, et, en cinquante années, on est passé de l'électromètre à feuilles d'or à l'analyseur multidimensionnel.

Si l'on fait le bilan des 10 années qui précèdent, les détecteurs électroniques ont surtout progressé grâce à deux types de systèmes :

- Les chambres à étincelles et à « dards », employées auprès des grands accélérateurs, qui sont particulièrement adaptées à l'emploi d'un ordinateur en ligne chargé de classer, de dépouiller et d'interpréter les données qui lui proviennent du détecteur.
- Les jonctions PN et surtout PiN de silicium et de germanium, auxquelles leur pouvoir de résolution en énergie, exceptionnel pour les rayons X et gamma, a ouvert un champ presque illimité d'applications.

Il semblerait que, durant cette même période, le mouvement d'abandon des détecteurs physiques n'ait fait que s'amplifier. Cela est vrai pour les émulsions photographiques qu'il est difficile de perfectionner, et dont l'on connaît les

* Le texte publié dans ce numéro de la Revue est le début du cours; la suite sera publiée dans les deux prochains numéros.

défauts; par contre, un nouveau détecteur physique est apparu, basé sur l'attaque chimique de la surface du détecteur qui a reçu le flux de particules à détecter : il s'agit du « détecteur solide de traces », qui ouvre un nouveau chapitre de l'ionographie. Certes, ces détecteurs ne peuvent déceler que des particules atomiques (sauf les protons, indétectables) et cela leur coupe la mesure de flux d'électrons ou de photons, mais ce défaut devient parfois une qualité. Egalement, leur emploi comme spectrographes reste encore incertain et doit être perfectionné.

Quoi qu'il en soit, les détecteurs solides de traces ont suscité, dans le monde entier, un très grand nombre de recherches. Leurs applications sont nombreuses et fructueuses.

Précisons les choses : le détecteur est une substance diélectrique. Tout le long de leurs trajets, les particules à déceler produisent des ionisations, créent des défauts cristallins, ou produisent des radicaux et des molécules excitées, etc.; elles créent ainsi une sorte de « *trace latente* », que le microscope électronique permet de mettre en évidence. La *trace développée* est obtenue après une attaque chimique appropriée de la surface de cette substance : les trajectoires se présentent sous la forme de canaux cylindriques ou coniques, faciles à étudier au moyen d'un microscope optique classique, en lumière transmise.

Ces détecteurs peuvent se classer en deux catégories : les détecteurs minéraux (cristaux artificiels ou naturels tels que micas, olivine, zircon, tourmaline, etc., ou substances de structures moins clairement définies telles que certaines céramiques); les détecteurs organiques, non cristallisés, et qui sont des substances artificielles, généralement commercialisées; les matières plastiques courantes et les hauts polymères entrent dans cette catégorie.

J'étudierai d'abord les particularités de l'image latente, et les conditions de son observation. La stabilité de cette image, avant développement, a une grande importance pratique, et c'est le point que je traiterai ensuite.

L'opération de développement chimique constituera le 3^e point de l'exposé. On verra quelles conditions d'ionisation spécifique, de masses, d'angles d'incidence doit remplir le projectile pour pouvoir être détecté.

Le comptage des traces développées, l'interprétation spectrographique de leurs caractéristiques constituent le 4^e point de cette étude.

On a établi un certain nombre de théories pour expliquer la formation de l'image latente, et l'attaque chimique. Elles sont encore très imparfaites, mais méritent d'être exposées en détails.

Enfin, la dernière partie de l'exposé traitera des applications, déjà si nombreuses, des détecteurs solides de traces. Elle nous transportera des rayons cosmiques et de la physique nucléaire à la biologie.

II - HISTORIQUE DE LA QUESTION

1. Il semble que la première publication traitant de cette question de manière spécifique est celle de YOUNG, dans la revue britannique « *Nature* », en 1958 [Yo-1]. Cet auteur irradiait des cristaux de fluorure de lithium, recouverts d'un matériau fissile, par des neutrons thermiques; il soumettait ensuite les cristaux à l'action

d'un bain corrosif (mélange de HCl et d'acide acétique glacial, saturé de FeCl_3). Il a obtenu des figures de corrosion, dues aux fragments de fission, se présentant sous la forme de pyramides à bases carrées, trouées à leur sommet. Parallèlement, la microscopie électronique a permis de mettre en évidence les défauts créés, avant toute attaque chimique. Cependant, le réactif avait été choisi sans fil directeur, et YOUNG ne put observer les trajectoires individuelles des fragments de fission dans le cristal.

Ce pas fut franchi en 1959 par SILK et BARNES [Si-1]. Ces auteurs ont employé des feuilles de mica muscovite alternées avec des feuilles d'aluminium recouvertes d'uranium, qu'ils exposèrent à des faisceaux de neutrons thermiques. Après irradiation, une étude au microscope électronique leur permit de déceler les traces latentes *individuelles* des fragments de fission.

Entre 1959 et 1962, de nombreuses études ont été faites au microscope électronique; elles ont concerné un grand nombre de composés minéraux cristallisés, dont voici une liste non limitative :

- Molybdénite [Iz-1],
- Graphite [Iz-2],
- Oxyde d'urane [Si-1], [Wh-1],
- Chrome, germanium [Bi-1],
- Iridium [Pr-1],
- Oxyde de molybdène MoO_3 [Bo-2],
- Cyanures d'argent AgCN et $\text{Ag}_2(\text{CN})_2$, [Bo-2],
- Aluminium, platine [Ke-1], [Ke-2], [No-2], [Ru-1].

Certaines permettaient d'observer des traces latentes, d'autres non.

2. La microscopie électronique est un moyen de diagnose puissant, mais qui met en œuvre des moyens assez importants; cela limitait les débouchés de cette technique. C'est en 1962 que PRICE et WALKER [Pr-1] publièrent les résultats de l'attaque chimique de cristaux minéraux irradiés : il s'agissait de mica du type fluor-phlogopite, attaqué par de l'acide fluorhydrique. L'acide produit une vérifiable « eau-forte » : le mica se trouve très fortement creusé le long de chacune des traces.

De manière indépendante, BONFIGLIOLI *et alii* [Bo-1] et PRICE et WALKER [Pr-1], [Pr-2], donnèrent les premières idées concernant le mécanisme possible de l'attaque chimique des matériaux minéraux et de la formation des traces.

3. Enfin, on enregistra une nouvelle progression avec la détection des particules α et des deutérons, en employant des composés organiques (hauts polymères divers) sous forme de feuilles, que l'on attaque par une base en solution aqueuse ou alcoolique.

4. Les travaux de recherche et d'application se poursuivent partout, très activement. En France, après un départ timide, cette technique a été étudiée par un certain nombre de laboratoires. Citons, parmi les principaux :

a) ETUDES FONDAMENTALES SUR CES DÉTECTEURS :

- Laboratoire de physique nucléaire, Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand (groupe de M. MONNIN).

- Laboratoire de Physique corpusculaire de la Faculté des Sciences de Strasbourg (groupe de Mme DEBEAUVAIS).
- Institut de physique nucléaire, Université de Paris (groupe de M. MAURETTE).
- Laboratoire de Chimie-Physique de la Faculté des Sciences de Paris.

b) APPLICATIONS DIVERSES

- Laboratoire de Minéralogie du Muséum National d'Histoire Naturelle (M. PELLAS).
- Centre de Physique Atomique et Nucléaire, Faculté des Sciences de Toulouse et Laboratoire des Rayonnements ionisants, Faculté des Sciences de Limoges.
- Centre d'Etudes Nucléaires du C.E.A., Fontenay-aux-Roses (service de métallurgie du Plutonium, service technique d'études de protection).
- Laboratoire Central de l'Armement (Arcueil).

III - ÉTUDE DE LA TRACE LATENTE

Elle est due aux perturbations apportées au matériau par la particule incidente. Son étude revêt donc une grande importance dans les mécanismes des phénomènes.

CONDITION DE FORMATION DE LA TRACE LATENTE

La condition est que *le matériau détecteur doit présenter une résistivité suffisamment importante* : les traces se forment dans tous les isolants, quelle que soit leur structure (cristaux, verres, hauts polymères, etc.). Par contre, on n'a jamais décelé de traces latentes dans les bons conducteurs. Le tableau I, tiré de [Fl-21] résume la situation : seuls les matériaux de résistivité supérieure à 2 000 ohms-centimètres peuvent enregistrer des traces.

Cette propriété est explicable : MERKLE [Me-1], NOGGLE et STIEGLER [No-1], WHAPHAM et MAKIN [Wh-1], entre autres, ont montré que, dans les métaux et les semiconducteurs, les défauts se situent uniquement à la surface du matériau, et qu'il y a guérison dans le volume. Au contraire, dans les isolants, les phénomènes subsistent dans la masse de l'échantillon, et ce sont eux qui sont responsables de l'existence de l'image latente.

OBSERVATION DE LA TRACE LATENTE : MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

Cette technique n'est utilisable que si l'on peut réaliser des lames d'échantillon de très faible épaisseur : des électrons de 100 keV ne permettent de sonder que des épaisseurs de l'ordre de quelques milliers d'angströms. Les micas se prêtent bien

à un clivage en lamelles très minces, et cela explique pourquoi ils ont été beaucoup étudiés.

TABLEAU I
EXISTENCE DE TRACES LATENTES EN FONCTION DE LA RÉSISTIVITÉ DU MATÉRIAU
[Fl-21]

	Matériau étudié	Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$)
I - Traces		
Isolants	Silicates minéraux Verres isolants Polymères	10^6 à 10^{20}
Isolant faible	Bisulfite de molybdène	3 000 à 25 000
Semi-conducteurs	Verre V_2O_5	2 000 à 20 000
II - Pas de traces		
Semi-conducteurs	Silicium Germanium	10 à 2 000
Métaux	Tungstène Zinc Cuivre Platine Aluminium Or	10^{-6} à 10^{-4}

L'aspect de la trace obtenue dépend beaucoup de la nature du matériau :

- *Les films polycristallins* minces présentent des variations importantes de densité d'un point à un autre : le pouvoir de pénétration des électrons varie beaucoup avec la région traversée. Les fragments de fission donnent des traces claires sur fond sombre, ces traces provenant de contrastes d'absorption [Bi-1], [Ch-1], [Pr-11], [Wh-1].
- *Un monocristal* (épaisseur bien constante) est très homogène, et l'on ne constate aucun contraste d'absorption. Par contre, la particule incidente (fragment de fission) crée dans le réseau cristallin des défauts, qui sont la cause de phénomènes de diffraction électronique. La trace se présente alors comme une ligne sombre sur un fond gris uniforme. Selon la nature du mica étudié, on obtient ainsi des traces de largeur comprise entre 30 Å et 200 Å, pour les fragments de fission. Dans le cas des matériaux organiques, les résultats sont assez analogues.

Le faisceau électronique employé est assez dense pour produire un échauffement local du matériau étudié : cela provoque un « effacement » progressif de la trace. Dans certains cas, la trace latente disparaît en moins d'une minute [Bo-1], [Pr-1], [Si-1]. C'est une sérieuse difficulté. On peut diminuer la vitesse de l'effacement en refroidissant l'échantillon, lors de l'observation, par de l'azote liquide [De-3], [Pr-1], mais on n'arrive jamais à l'arrêter totalement.

Au total, le microscope électronique s'avère intéressant pour étudier le mécanisme de formation des traces, mais il n'est plus utilisable en routine, parce qu'il y a toujours un effacement progressif, parce que le faible parcours des électrons fait qu'on ne peut observer qu'une faible portion de la trajectoire, même dans le cas de particules très lourdes, comme les fragments de fission, et surtout Parce que le champ d'observation est toujours très petit : on ne peut dénombrer les traces que si leur densité est suffisamment élevée pour qu'il y ait un nombre suffisant de traces à l'intérieur de chaque champ d'observation.

Il faut cependant remarquer que les microscopes électroniques à tension élevée, tels que ceux qui existent à Toulouse (1,3 MeV et 3 MeV) doivent conduire à un renouveau d'intérêt concernant cette technique; en particulier, ils devraient permettre de mieux lier l'aspect de la trace, sondée sur une épaisseur beaucoup plus grande, au mécanisme supposé de formation de cette trace (voir plus loin). N'oublions pas que le parcours maximal des électrons de 3 MeV est de 1,2 cm environ dans le plexiglass.

Quel que soit le développement futur des autres méthodes de dépouillement des données, le pouvoir séparateur très élevé du microscope électronique en fait l'appareil irremplaçable dans les mesures d'intervalle de temps très courts : la résolution spatiale, liée à la largeur des traces, est de 30 Å. Or, une particule se déplaçant avec une vitesse égale au dixième de celle de la lumière, parcourt cette distance en 10^{-16} s environ. On se trouve très au-dessus des performances des systèmes électroniques les plus récents (10^{-11} à 10^{-12} s).

Remarque

La microscopie électronique peut être aussi employée pour observer les traces obtenues après le développement chimique. Par exemple, TRIPIER *et alii* [Tr-1] ont observé ainsi l'évolution de la trace en fonction du temps de développement, pour des ions lourds tombant sur des membranes minces de nitrate de cellulose.

La trace développée se forme selon quatre phases successives :

1. Un temps « mort », pendant lequel aucun défaut n'apparaît. Ce temps est d'autant plus long que le T.L.E. instantané $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ de la particule est plus faible.
2. Il apparaît une fine trace noire, entourée d'un halo sombre.
3. Si la membrane de nitrate de cellulose est d'épaisseur inférieure au parcours de l'ion, il se forme ensuite un cône de rongement à chaque extrémité de la trace noire correspondant à l'entrée et à la sortie de l'ion dans le détecteur.
4. Ces cônes progressent l'un vers l'autre et se rejoignent. La trace se présente alors sous la forme d'un tronc de cône (presque un cylindre) vide de matière, qui s'élargit au fur et à mesure que le temps de développement augmente.

PRICE et WALKER ont étudié un mica de synthèse le « fluor-phlogopite » [Pr-2], [Pr-6] : au bout d'un temps court d'attaque par HF, on constate que le contour sombre, qui entourait la trace, disparaît; le diamètre observé est alors de l'ordre de 10 Å, ce qui ne correspond pas à la largeur réelle du canal, qui est de 25 à 30 Å seulement. Je reviendrai sur cette question.

On remarquera, dès à présent, l'importance du temps de développement dans l'aspect de la trace obtenue. J'y reviendrai plus loin; nous verrons qu'on établit des lois empiriques liant la largeur de la trace, le T.L.E. instantané, la concentration du réactif, la durée du développement.

Traces obtenues au microscope électronique, après développement :

- Ions Soufre de 50 MeV, dans le nitrate de cellulose (angle d'incidence 10°).
- Développement durant 5 minutes par Na OH (4 %) à 60°C .
- Grossissement : 40 000.

(Cliché obtenu par Mme DEBEAUVAIS, Laboratoire de physique corpusculaire, Université de Strasbourg).

OBSERVATION DE LA TRACE LATENTE : DIFFRACTION DE RAYONS X

Plus encore que le précédent, ce procédé d'observation est intéressant pour établir des mécanismes physiques, mais inutilisable en routine. Cette technique a été mise en œuvre par LAMBERT, LEVELUT et MAURETTE [La-1], qui l'ont employée pour observer les traces laissées dans le mica par des ions d'argon. Les auteurs étudient la diffusion aux petits angles, pour obtenir l'aspect des traces.

Dans le mica, les traces latentes résultent de la coexistence de défauts de deux types :

1. Les défauts les plus abondants sont formés par des groupes de deux ou trois atomes; la distance entre ces défauts diminue lentement, avec l'énergie, dans la région étudiée (10 à 1 MeV/uma).

2. Des « nuages » de défauts, de diamètre de l'ordre de 30 Å environ. Ces nuages sont distants de 200 Å environ; ils semblent apparaître brutalement, quand l'énergie résiduelle de l'ion est inférieure à 6 MeV/uma. Ces défauts importants pourraient être responsables de la trace développée, bien que la distance qui les sépare soit supérieure à la valeur maximale critique de 100 Å, établie par MAURETTE [Ma-6], nécessaire à l'obtention d'une trace développable dans le mica.

Ces renseignements sont précieux dans l'établissement du mécanisme de formation de l'image latente.

STABILITÉ DE LA TRACE LATENTE

Ce point est d'une importance pratique considérable. En effet, de nombreux détecteurs physiques souffrent d'un effacement progressif de la trace latente, et cela pèse très lourd dans leurs modalités d'application pratique.

Contrairement aux émulsions nucléaires, les détecteurs solides de traces conservent, à la température ambiante, l'empreinte des particules indépendamment du temps qui s'est écoulé entre l'irradiation et le développement, même après plusieurs années dans le cas des milieux organiques, et de très nombreux siècles dans celui des cristaux minéraux. Là réside l'une de leurs supériorités sur les émulsions.

Je passerai en revue les principaux paramètres dont est fonction la stabilité de la trace latente : le temps, la nature du milieu, la température, la pression, l'ambiance lumineuse. Les résultats cités doivent être considérés comme indicatifs, car la composition du détecteur est variable d'un échantillon à un autre. Cela est particulièrement vrai dans le cas des détecteurs organiques. Là réside un problème d'emploi de ces détecteurs, malgré certains essais d'homogénéisation de la sensibilité par incorporation au milieu de certains organo-métalliques [En-1].

1° TEMPS DE STOCKAGE DU MATÉRIAU

Ainsi que je viens de le dire, la stabilité des défauts est très grande, et nous verrons que cela est explicable par les mécanismes de formation avancés actuellement.

Après un réarrangement très rapide, il y a stabilisation absolue des défauts du réseau cristallin, dans le cas des substances minérales.

Dans celui des composés organiques, le passage de la particule crée des radicaux libres et des espèces chimiques très réactives; les radicaux se trouvent « encagés »; l'équilibre chimique peut n'être atteint qu'au bout de plusieurs années, ce qui produit une évolution très lente de l'image latente. Cela est mis clairement en évidence par l'influence du milieu ambiant.

2° NATURE DU MILIEU AMBIANT

L'humidité de l'air n'a pas d'influence, contrairement à ce qui se passe dans le cas des émulsions nucléaires. Par contre, la vitesse d'attaque V le long de la trace

augmente faiblement en fonction du temps [Pr-12], quand on stocke le détecteur dans l'air.

Cette constatation a suscité une étude détaillée de BENTON et ses collaborateurs [He-2] : le stockage du matériau, dans le noir, sous oxygène, produit une augmentation, assez faible par ailleurs, de V , en fonction du temps. Sous atmosphère inerte (gaz rare), V reste constante. Enfin, un stockage sous vide a pour effet de diminuer V .

On pense que l'oxygène réagit lentement avec les espèces chimiquement actives, dont les radicaux libres « encagés » dans la structure du matériau, pour former des radicaux de type peroxydique, qui sont plus réactifs avec l'agent de développement.

Ces observations pèsent très lourd dans l'établissement du mécanisme de développement.

3° TEMPÉRATURE

Là encore, la stabilité des détecteurs solides de traces est très remarquable.

a) *Températures élevées.* Dans les micas, la stabilité subsiste jusqu'à 400 °C environ, jusqu'à 550 °C dans le cas des verres, et jusqu'à 150 °C au maximum dans celui des hauts polymères. Au-dessus, se produisent des phénomènes complexes que je ne ferai qu'évoquer ici.

PRICE et WALKER [Pr-1] ont trouvé que, dans un mica synthétique qui a été chauffé à 780 °C, les traces s'élargissent à leurs extrémités selon des formes angulaires bien définies, tandis que leur partie centrale diminue de largeur, jusqu'à disparaître, dans certains cas. Les micas naturels, le muscovite et le phlogopite sont plus stables : un recuit à 800 °C durant une heure ne fait pas disparaître totalement la trace latente. Il faut atteindre 900 °C au moins, pour que les traces disparaissent progressivement.

Comme on peut s'y attendre, les polymères organiques sont les substances les plus fragiles aux températures élevées : dans le nitrate et l'acétobutyrate de cellulose, la détérioration commence dès 100 °C.

D'une manière générale, le matériau est d'autant moins stable thermiquement, qu'il est plus sensible aux particules.

b) *Basses températures.* Les traces formées dans le mica [Fl-18] ou dans les verres [Be-2] [Be-3] donnent les mêmes apparences à 77 °K qu'à la température ambiante. D'après FLEISCHER [Fl-18], les traces dans le lexan résistent également très bien aux basses températures.

c) *Mécanisme.* L'action de la température est encore mal connue et l'on ne peut donner que des formules empiriques. C'est ainsi que WIDELL [Wi-1] a établi par l'expérience que, dans le mica muscovite, le temps t au bout duquel la trace disparaît est lié à la température absolue T par la relation :

$$t_{\text{heures}} = 10^{-15} \exp(2,8/kT);$$

k étant la constante de BOLTZMANN.

4^o PRESSION

Cette question a été peu étudiée. Il semble que la pression produise des effets extrêmement faibles. Ainsi, les traces dans des échantillons de zircon et d'olivine soumis à des pressions de 80 kbar ne sont pas modifiées; un recuit produit les mêmes effets qu'en l'absence de cette surpression [Fl-18].

5^o RAYONNEMENT ULTRAVIOLET

L'action d'un rayonnement électromagnétique est mal connue. Cette question est pourtant intéressante, car elle est liée à celle du développement en présence d'un rayonnement U.V. [Be-2], [He-2].

Dans le lexan, les traces sont insensibles aux rayons U.V. Par contre, le nitrate de cellulose est rapidement décomposé par la lumière ultraviolette, mais il s'agit là d'une action photochimique très classique.

* * *

Nous verrons plus loin que la trace latente n'est développable que si les dommages correspondants sont suffisamment importants. Il serait particulièrement intéressant de parvenir à « sensibiliser » cette trace latente, pour arriver à détecter des particules moins ionisantes, comme les protons.

Un moyen possible pourrait être de soumettre le matériau à des tensions élevées. Il pourrait se produire dans le volume des avalanches électroniques, assez analogues à celles que l'on obtient dans les jonctions PN de semiconducteur pour déceler des phénomènes peu ionisants. Ces avalanches électroniques se produisant sélectivement le long des traces, pourraient augmenter le nombre et l'importance des défauts correspondants.

IV - OPÉRATION DE DÉVELOPPEMENT PROPRIÉTÉS DE LA TRACE DÉVELOPPÉE

Nous verrons ici combien est délicate l'opération de développement de la trace latente : toutes ses modalités doivent être précisées si l'on veut parvenir à des résultats reproductibles. Cette technologie est variable à l'infini; elle a suscité un très grand nombre de publications, qui se contredisent parfois.

Dans la seconde partie de ce chapitre, je donnerai les conditions qui doivent se trouver simultanément vérifiées pour que la trace latente soit développable. Cela me conduira à étudier plus particulièrement *la vitesse d'attaque V le long de la trajectoire*, et à considérer les paramètres dont dépend cette caractéristique fondamentale du développement. Je dirai aussi quelques mots du processus d'attaque latérale depuis la trace développée, qui peut conduire à des procédés nouveaux de diagnose de particules.

TECHNOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE LA TRACE LATENTE

Le développement permet d'observer les traces de manière simple, c'est-à-dire individuellement, par microscopie optique, ou, globalement, par densitométrie. Je consacrerai une partie du chapitre suivant au mode d'exploitation des données.

La technologie varie beaucoup selon la nature du matériau, et je passerai donc en revue les divers cas possibles.

1 - MICAS DIVERS

Le réactif de choix est l'acide fluorhydrique en solution aqueuse, à des concentrations variables. Ainsi, à 50 °C, une solution de 20 % de HF pour 80 % de H₂O, attaque les micas trois fois plus rapidement que l'eau régale.

Les canaux obtenus ont une largeur qui est fonction de la nature du mica, de celle de l'agent chimique, de la température, et du temps d'attaque. Je reviendrai plus loin sur tous ces paramètres.

FIG. 1. — Largeur des traces dans divers micas en fonction du temps d'attaque par HF à 20 %.

a) 50 °C

b) 20 °C d'après PRICE et WALKER.

PRICE et WALKER ont fait des études systématiques [Pr-2], [Pr-6] qui sont résumées sur la figure 1.

La feuille de mica irradiée (par des ions très lourds ou des fragments de fission) est plongée dans le réactif chimique. Autour de chaque trajectoire de particule, l'attaque se développe en trois phases successives, mises en évidence sur la figure 1 :

Première phase : Aussitôt après l'immersion, l'acide attaque le long de la trajectoire et forme un canal continu, de largeur constante.

Le diamètre de la trace est de l'ordre de 25 Å [Pr-1] à 30 Å [Ma-6]. Cette valeur s'accorde bien avec la largeur moyenne de la région endommagée par le passage de la particule chargée, telle que l'on peut l'obtenir par le calcul [Pr-2], [Ro-1]; on est ainsi conduit à penser que, dans cette phase, l'acide attaque la partie du solide modifiée par le passage de la particule.

Cette première partie de l'attaque est très rapide, alors que les deux phases suivantes sont beaucoup plus lentes.

Seconde phase : la vitesse d'attaque y est très faible et on assiste ici à une sorte d'« incubation », le temps d'incubation étant celui nécessaire pour imprégner d'acide frais les parois du canal, et pour que cet acide commence à dissoudre latéralement le mica qui entoure le canal central. Le temps d'incubation est d'autant plus long que la température est plus basse. On n'a pas déterminé l'influence de la viscosité du réactif, et il y aurait là des expériences intéressantes.

Troisième phase : l'attaque latérale s'effectue, et la vitesse d'élargissement du canal est la même tout le long de la trace. On constate que *le canal, cylindrique, ne s'allonge pas, et ne se termine pas par une pointe, contrairement à ce qui a lieu dans le cas des verres et des matières plastiques.*

Le milieu cristallin est anisotrope. La vitesse latérale d'attaque est maximale dans la direction parallèle aux plans de clivage du mica. Il faut remarquer ici, que, par contre, les bases attaquent surtout perpendiculairement aux plans de clivage. Ces questions mériteraient d'être étudiées plus en détail, ne serait-ce que pour avoir des renseignements sur la corrosion chimique.

D'une manière générale, la vitesse avec laquelle se succèdent ces trois phases dépend beaucoup de la manière dont l'acide frais arrive au contact du matériau à attaquer. Ainsi, le développement est très accéléré par un brassage aux ultrasons [Ma-5].

2 - MATÉRIAUX DU TYPE « VERRES »

Ces matériaux ne sont pas choisis au hasard : il s'agit des céramiques employées en dosimétrie, et, essentiellement :

- Des verres au métaphosphate d'argent, qui sont radiophotoluminescents et sont employés couramment en dosimétrie [Be-2], [Be-3], [Ba-7]. Ces verres, qui possèdent un très bon état de surface, permettent de révéler facilement les traces.
- De verres thermoluminescents, comme les verres au silicate d'aluminium et de lithium activé au terbium [Be-2], d'un emploi dosimétrique moins courant.

On connaît mal la structure de ces céramiques, dont les structures doivent être en partie organisées.

On peut employer tout autre type de verre, à condition qu'il soit suffisamment soluble dans les réactifs chimiques habituels (HF ou NaOH par exemple) et qu'il puisse subir un poli très soigné.

Dans tous les cas, les traces développées ont des formes très différentes de celles dans les micas : *on obtient des cônes à bases circulaires ou elliptiques*, selon que la particule est tombée normalement à la surface, ou obliquement [Be-2], [De-1], [Pl-1].

Prenons le cas des verres dosimètres à l'argent réalisés dans le commerce (fig. 2) : le diamètre des traces de fragments de fission, mesuré à la surface du verre, augmente avec le temps d'attaque d'abord linéairement (jusqu'à 20 μm), puis plus lentement, et tend vers une valeur de l'ordre de 60 μm , pour un réactif constitué par de la soude en solution aqueuse (28 % de NaOH), agissant à 60 °C.

FIG. 2. — Augmentation du diamètre des traces en fonction du temps d'attaque, pour trois verres différents, les conditions d'attaque restant les mêmes, NaOH à 28 % et 60 °C. D'après [Be-2] - BAUSCH ET LOMB : Américain; C.E.C. : Français; TOSHIBA : Japonais.

Comme pour les micas, la vitesse d'attaque dépend de la nature du réactif (NaOH est plus efficace que HF) et de sa concentration, de la composition chimique du verre, et de la température. BECKER [Be-2] a montré que la vitesse d'attaque croît sensiblement de manière exponentielle en fonction de la température.

3 - CAS PARTICULIER DES COMPOSÉS MINÉRAUX CONTENANT DE L'ARGENT : DÉCORATION DES TRACES

Les verres au métaphosphate d'argent, dont il vient d'être question, entrent dans cette catégorie.

Je voudrais parler ici d'une technique de « décoration des traces », qui n'est pas, à proprement parler, chimique, mais s'apparente à la technique photographique. Elle a été mise en œuvre par CHILDS et SLIFKIN [Ch-6], [Ch-7], [Ch-8], [Ch-9], [Ch-10] et peut rendre des services dans certains cas.

Ces auteurs ont étudié des monocristaux de chlorure d'argent. Après irradiation, le cristal est soumis à des impulsions de champ électrique, synchronisées avec des flashes de rayonnement U.V. qui illuminent le cristal.

Chaque flash produit environ 10^9 photoélectrons par cm^2 de la surface du cristal. Ces photoélectrons, créés sur la surface, sont soumis à l'action du champ électrique et pénètrent dans le volume du cristal. Le temps de relaxation du champ électrique interne est de quelques centaines de microsecondes, alors que la durée de vie des photoélectrons est de quelques microsecondes. L'action des flashes U.V. se présente donc sous la forme d'impulsions de quelques microsecondes, espacées d'une milliseconde environ.

Le champ électrique, en phase avec les impulsions U.V., déplace les photoélectrons dans le volume, avant que la conductivité ionique puisse produire une relaxation appréciable : dans un cristal épais de quelques millimètres, la plupart des photoélectrons sont piégés par les défauts créés par chaque particule le long de sa trajectoire : les ions Ag^+ , situés en positions interstitielles, migrent et viennent se recombinaison avec ces électrons pour former des atomes neutres Ag^0 . La trace se trouve ainsi décorée.

Les cristaux de AgCl sont développés ainsi plus rapidement que les émulsions photographiques. Ils permettent des mesures très précises d'angles, car le traitement de décoration n'entraîne aucune distorsion géométrique.

D'autres sels, mais en nombre très limité, peuvent être traités par cette technique [Ad-1].

Certains verres au phosphate d'argent (P_2O_5 : 63 % - Al_2O_3 : 8 % - BaO : 11 % - K_2O : 9 % - Ag_2O : 9 %) ont été employés par FLEISCHER, PRICE et WALKER [Fl-1], [Wa-1] pour obtenir des traces décorées de fragments de fission. Après un recuit de 2 heures dans de l'hydrogène à 250 °C, on obtenait des traces de 50 Å de diamètre.

4 - MATIÈRES PLASTIQUES

Les polymères organiques sont très étudiés et très employés, car ils sont sensibles aux particules α de faible énergie, et, dans certains cas, aux deutérons.

Comme dans le cas des verres, leur structure physique, et en particulier le degré d'orientation des longues chaînes, est mal connu, et cela complique l'établissement d'un mécanisme de détection. De plus, les compositions et surtout les densités risquent de varier d'un échantillon à un autre. Il y a deux types de polymères :

a) *Les polymères vrais*, ou *polymérisats*, dont l'exemple le plus caractéristique est le polyéthylène $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$.

Ils se forment par des réactions d'addition : l'ouverture de la double liaison du monomère de départ entraîne la formation d'une chaîne linéaire, qui associe les molécules deux à deux :

Entrent dans cette catégorie de détecteurs :

- le polyméthacrylate de méthyle (plexiglass),
- le poly-oxyméthylène (Delrin),
- le polystyrène,
- les chlorures de vinyle et de polyvinyle,
- le polypropylène (Mophère),
- le polyéthylène.

Cette liste pourrait être beaucoup plus étendue.

b) *Les polycondensats*, qui sont des produits de condensation de la réaction entre deux composés bifonctionnels, dont les fonctions chimiques réagissent l'une sur l'autre. Par exemple, un diacide et une diamine donneront la réaction :

Parmi les polycondensats employés comme détecteurs, on peut citer :

- les polycarbonates (LEXAN, MAKROFOL), [Fl-1],
- le MYLAR et les composés celluloseux, nitrate, acétate et acétobutyrate [De-2], [Fl-1],
- le polytéraphthalate isophthalique d'hydroquinone-diphénol [Fl-21],
- les phénoplastes formophénoliques (ambrolite, bakélite) [Mo-5].

Cette liste n'a aucun caractère limitatif.

Le développement est habituellement obtenu par action chimique, mais on commence à utiliser des solvants.

1° *Développement par action chimique* (le tableau II résume la situation).

On peut employer les acides et les bases, mais ces dernières sont beaucoup plus efficaces. Les concentrations et la nature du solvant sont très variables; ce sont la soude et la potasse en solution aqueuse ou alcoolique qui sont les plus employées [Fl-1]. Par exemple, dans le cas des nitrates et des acétates de cellulose, la soude en solution aqueuse donne les meilleurs résultats et la meilleure sensibilité dans la détection des particules α [Bl-1].

TABLEAU II

PRINCIPAUX DÉTECTEURS ORGANIQUES, AVEC LES RÉACTIFS EMPLOYÉS POUR LE DÉVELOPPEMENT DES TRACES. D'après MONNIN [Mo-7]

Détecteurs	Réactifs	Température °C	Temps mn	Particules enregistrées
Polyéthylène	$K_2Cr_2O_7$	85	30	
Polyéthylène ionomérique	$K_2Cr_2O_7$	55	60	
Polypropylène	$K_2Cr_2O_7$	85	20	
Polystyrène	$K_2Cr_2O_7$ KOH $KMnO_4$	85 75 80	180 60 360	F.F.
Chlorure de PVC	$KMnO_4$ KOH	80 75	270 100	
Acétochlorure de polyvinyle	$KMnO_4$ KOH	100 75	30 40	
Chlorure de polyvinyl- vinylidène	$KMnO_4$ KOH	55 75	120 50	F.F.
Polyméthacrylate de méthyle	$KMnO_4$ KOH	100	16 20	α (3 MeV), ions lourds, F.F.
Phénoplaste formophénolique	$K_2Cr_2O_7$	86	5	
Polyphénoxyde	$KMnO_4$	100	5	
Acétate de cellulose	NaClO NaOH	100 55	30 40	Ions lourds, F.F. Particules α
Acétobutyrate de cellulose	$KMnO_4$ NaClO NaOH	100 100 55	4 140 40	α , ions lourds, F.F.
Nitrate de cellulose	$KMnO_4$ NaClO $K_2Cr_2O_7$ NaOH	100 100 85 55	0,5 6 5 2,5	Ions lourds et F.F. Particules α
Polycarbonate	$K_2Cr_2O_7$ $KMnO_4$ NaClO KOH NaOH	85 100 100 60 55	120 120 55 0,3 40	Ions lourds et F.F. Particules α

TABLEAU II (suite)

Détecteurs	Réactifs	Température °C	Temps mn	Particules enregistrées
Polytéréphtalate d'éthylène glycol	KMnO ₄	100	90	
	NaClO	100	80	
	KOH	60	0,3	
	NaOH	55	40	
Polyimide	KMnO ₄	100	90	
	NaClO	100	16	
	NaOH	55	0,1	

Les réactifs sont désignés par la formule chimique de leur composant essentiel :

- KMnO₄ : solution aqueuse de permanganate de potassium à 25 %,
- K₂Cr₂O₇ : solution de 10 g de bichromate de potassium dans 35 cm³ d'acide sulfurique à 30 %,
- NaClO : solution aqueuse à 14 % d'hypochlorite de sodium et 12 % de chlorure de sodium,
- KOH : solution de 200 g de potasse dans 1 000 cm³ de solution éthylique à 95 °G-L,
- NaOH : solution de soude cinq fois normale.

FIG. 3. — Diamètre des traces de fragments de fission en fonction du temps d'attaque pour un plastique d'acétate et butyrate de cellulose, attaqué par NaOH 6,25 N [Bl-1].

FIG. 4. — Logarithme de la vitesse latérale d'attaque en fonction de T^{-1} pour un certain nombre de plastiques. Pour l'acétate de cellulose, 7 parties de NaOH 6,25 N pour 5 parties de NaClO à 12 %. Pour les autres composés NaOH 6,25 N [Bl-1].

MONNIN [Mo-5], [Mo-6] a montré qu'on peut employer, dans certains cas, le permanganate et le bichromate de potassium, qui sont des oxydants.

Les traces présentent une allure analogue à celle des traces dans les verres : ce sont des cônes à base circulaire ou elliptique. Quand la vitesse V d'attaque le long de la trace est très grande, l'ouverture du cône est très faible, et la trace a pratiquement un aspect cylindrique [Fl-1].

La vitesse d'attaque dépend, comme toujours, de la température, de la nature et de la concentration du réactif chimique. A titre d'exemple, la figure 3, tirée de [Bl-1] donne, pour des fragments de fission tombant sur de l'acéto-butyraté de cellulose, la variation du diamètre de la trace à la surface du plastique, en fonction du temps, pour diverses températures. Dans ce cas particulier, la vitesse latérale d'attaque est de la forme $Ae^{-Q/kT}$, Q étant l'énergie d'activation correspondant à l'attaque chimique. La figure 4 permet de voir que cette formule se vérifie bien, et qu'il est possible d'en déduire, à 15 % près environ, la valeur de Q . Il ne faut pas confondre cette vitesse latérale d'agrandissement de la trace avec la vitesse V que j'étudierai plus loin; elle est plus proche de la vitesse v normale d'attaque du matériau.

Il faut noter aussi, ce qui est important, que la vitesse d'attaque dépend fortement de la particule incidente. La figure 5 concerne des lames de nitrate de cellulose, développées par la soude [De-8], [St-1]; elle donne la longueur de trace

FIG. 5. — Développement des traces de particules α et de fragments de fission pour une concentration de NaOH fixée à 10 % (température fixée à 40°).

projetée selon la normale à la surface du plastique, en fonction du temps, pour des fragments de fission et pour les particules α de ^{210}Po . Cette longueur tend vers le parcours de la particule dans le matériau détecteur.

2° Développement par dissolution

Cette question est intéressante, car elle montre la possibilité de révéler les traces par des procédés non chimiques [Me-3]. On a expérimenté l'action de solvants polaires seuls (alcools ou aldéhydes, par exemple), complétée ensuite par un lavage à l'eau [Sa-1].

Hélas, les résultats sont peu reproductibles. Néanmoins, l'action des solvants confirme qu'il y a dépolymérisation de la région développée. Cette question doit être suivie avec soin.

*
* *

La mise en œuvre de la technologie du développement frappe par son empirisme. On arrive mal à saisir quelles sont les raisons précises qui font préférer un réactif à un autre. Il serait souhaitable d'étayer les considérations empiriques par des calculs de dynamique et d'équilibre chimiques.

On sent intuitivement qu'il doit exister de meilleurs procédés de développement que ceux qui sont actuellement employés. De telles méthodes devraient permettre de voir certains phénomènes qui restent inaperçus. On pourrait peut-être obtenir des traces dans certaines substances comme le rutile, qui semblent actuellement inactives à ce point de vue.

CONDITIONS A REMPLIR POUR QUE LA TRACE SOIT DÉVELOPPABLE

1° RÔLE DE LA SURFACE DU DÉTECTEUR

Il faut que la région du solide modifiée par le passage de la particule soit accessible au réactif chimique. Il est donc indispensable que la zone de dommages créée prenne naissance à la surface du détecteur. Une particule chargée dont la totalité 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 qui n'est généralement pas le cas.

2° IONISATION CRÉÉE PAR LA PARTICULE

Une des caractéristiques fondamentales de ces détecteurs est qu'ils sont incapables de déceler les particules légères (mésons, électrons, par exemple)

et qu'ils ne sont utilisables que pour les particules lourdes (sauf les protons, qui n'ont pu être mesurés).

a) *Transfert d'énergie linéique instantané $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ de la particule*

Cette quantité a d'abord été employée comme critère de développabilité de la trace latente, ce critère indiquant que la perte d'énergie de la particule par unité de longueur doit être suffisante pour que les dommages en résultant conduisent à l'attaque chimique.

On définit donc une valeur critique de T.L.E., $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ au-dessous de laquelle la détection est impossible. Au-dessus, l'efficacité tend vers l'unité.

Au voisinage de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ se situe une région de transition, dans laquelle l'efficacité passe rapidement de 0 à 1. Dans cette région, les traces ne sont enregistrées que partiellement, et se présentent sous forme de traces courtes ou de pointes.

On peut classer les matériaux détecteurs selon la valeur correspondante de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$. Voir le tableau III : on constate que les matières plastiques possèdent des valeurs de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ très inférieures à celles des substances minérales.

Les particules α ne sont détectables que si $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c < 2 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$. Les matériaux de $\left(\frac{dE}{dx}\right)_c > 15 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ n'enregistrent pas les ions produits par les accélérateurs; ils ne sont utilisables que pour certains rayons cosmiques primaires et pour les fragments de fission.

Cependant, il est apparu que le critère de T.L.E. critique ne constitue qu'une première approximation assez grossière. En voici deux preuves :

TABLEAU III

CARACTÉRISTIQUES D'ENREGISTREMENT DE DIVERS TYPES DE DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES

1^o Caractéristiques d'enregistrement des différents polymères.

D'après [De-8]

Détecteurs	$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ MeV $\cdot$ mg ⁻¹ $\cdot$ cm ²	Nature de l'ion	Energie
Composés { Nitrate	0,86	α	< 3 MeV
cellulosiques { Acétate	1,41	α	< 2 MeV
{ Acétobutyrate	1,21	α	< 2 MeV
Polyoxyméthylène	—	α	≈ 2 MeV
Polycarbonate	5,50	O	< 30 MeV
Téréphtalate d'éthyle	21,60	S	< 30 MeV
Phénoplaste	—	F-Fission	≈ 80 MeV

2° Caractéristiques d'enregistrement des fragments de fission.

D'après [Ma-6]

Nature du détecteur	μ_c (mg/cm ²)	E_c (MeV)	$(dE/dx)_c$ MeV · mg ⁻¹ · cm ²
Olivine	0,9	40	25
Muscovite	2,1	15	15
Makrofol	2,0	17	23
Chambre à détente (chambre de WILSON)	2,8	≈ 0	≈ 0

1. Le tableau IV, tiré de [Fl-32] montre qu'il n'existe pas une corrélation rigoureuse entre la valeur de l'efficacité et le transfert linéique d'énergie, donc que ce critère est très imparfait.

2. D'une manière précise, l'étude du rayonnement cosmique a montré que des ions de $\left(\frac{dE}{dx}\right) > \left(\frac{dE}{dx}\right)_c$ peuvent ne pas être détectés, *s'il s'agit de particules relativistes*.

Un exemple est celui constaté lors du vol de GEMINI VI [Be-9] : plusieurs disques de nitrate de cellulose avaient été placés dans la cabine en vue d'étudier les rayons cosmiques. Des noyaux relativistes de fer n'étaient pas détectés, bien que leur T.L.E. soit supérieur à la valeur critique, alors que des particules α non relativistes, de même T.L.E., étaient enregistrées normalement.

Ces perturbations sont dues aux rayons δ très nombreux, créés par les particules *relativistes*. Ces électrons secondaires d'énergie élevée viennent créer une ionisation *loin de leur point de création*, si bien que la perte d'énergie par unité de longueur peut être supérieure au seuil sans que l'ionisation qui en résulte en ce point corresponde à cette valeur du T.L.E., les électrons δ venant porter l'ionisation plus loin. Le rôle des rayons δ est important dans le mécanisme de création de la trace latente; il a été mis clairement en relief par les travaux de KATZ et KOBERICH [Ka-4], sur lesquels je reviendrai plus loin.

Au total, il faut sélectionner un critère *lié à l'ionisation et non lié à la perte d'énergie* de la particule.

b) *Ionisation spécifique* $\left(\frac{dI}{dx}\right)$ de la particule.

Ce critère plus exact a été introduit par FLEISCHER *et alii* [Fl-33], dans le cadre de leur théorie de l'explosion ionique. Ils définissent une valeur critique

$\left(\frac{dI}{dx}\right)_c$ de l'ionisation spécifique de la particule primaire.

TABLEAU IV

CONDITIONS D'ENREGISTREMENT DES TRACES DANS DIVERS DÉTECTEURS [Fl-33] D'APRÈS LES PUBLICATIONS ORIGINALES

Ion	Energie (MeV)	Efficacité	Longueur de la trace (μm)
<i>Mica muscovite</i>			
^{40}Ar	9	1	3
^{40}Ar	16	1	4
^{28}Si	14	1	3
^{20}Ne	2 ou 3	Inconnue	> 1
^4He	0 à 4,5	0	0
<i>Polycarbonate du type Lexan</i>			
^{35}Cl	363	1	Egale au parcours
^{28}Si	290	1	»
^{28}Si	46	1	»
^{20}Ne	207	0	0
^{20}Ne	70	1	Egale au parcours
^{20}Ne	19,4	1	»
^{16}O	166	0	0
^{16}O	88	0	0
^{16}O	15,5	1	Egale au parcours
^{12}C	124	0	0
^{12}C	25	1	Egale au parcours
^{12}C	11,65	1	»
^4He	0,1 à 0,2	Elevée	1 à 2
<i>Nitrate de cellulose clair (Nixon-Baldwin)</i>			
^4He	3,2	Faible	16
^4He	2,5	1	12
^2H	0,2	1	3
Fe	$\geq 84\ 000$	0	0
Valeur de $Z = 11 \pm 1$	880	1	> 500
^{12}C	124	0	0
^{12}C	100	1	Egale au parcours
<i>Nitrate de cellulose orange (Nixon-Baldwin)</i>			
^4He	5,3	Faible	35
^4He	4,0	1	24

Pour une particule relativiste de $\left(\frac{dI}{dx}\right) > \left(\frac{dI}{dx}\right)_c$, l'ionisation spécifique reste pratiquement constante le long d'une distance de pénétration supérieure à la distance x_m minimale nécessaire à l'observation d'une trace. Pour un microscope optique de caractéristique classique, x_m , lié au pouvoir de résolution de l'instrument, est de 1,5 à 2 microns. L'efficacité de détection est égale à l'unité et la longueur de la trace, supérieure à x_m , est de l'ordre de grandeur du parcours de la particule dans le matériau détecteur.

Pour des particules de $\left(\frac{dI}{dx}\right)$ plus faible, l'efficacité diminue et les traces, plus courtes, deviennent de longueur plus faible que le parcours de la particule. Enfin, pour $\left(\frac{dI}{dx}\right) < \left(\frac{dI}{dx}\right)_c$, l'efficacité est nulle.

L'ionisation spécifique est donnée par la formule de BETHE :

$$\frac{dI}{dx} = \left[\frac{\alpha Z_e^2}{I_0 \beta^2} \right] [\text{Log} \{ 2 mc^2 \beta^2 / (1 - \beta^2) I_0 \} - \beta^2 + 3,04]$$

Z_e , étant la charge effective de la particule incidente,

β , le rapport de la vitesse de cette particule à la vitesse c de la lumière,

m , la masse de l'électron,

I_0 , l'énergie nécessaire pour ioniser le matériau, pour un électron de la couche atomique externe,

α , une constante, caractéristique de la nature du milieu détecteur.

La charge effective de la particule est donnée par [He-1] :

$$Z_e = Z [1 - \exp (- 125 \beta / Z^{2/3})]$$

Cette formule est valable jusqu'à des valeurs de β de l'ordre de $0,25 \cdot 10^{-2} Z^{2/3}$, Z étant compris entre 2 et 20.

La formule de BETHE est incomplète car elle ne tient pas compte des rayons δ , et des recherches plus récentes ont eu pour but de la compléter [Ka-4].

S'appuyant sur cette formule, la figure 6, tirée de [Fl-33], donne $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ et $\left(\frac{dI}{dx}\right)$ en fonction de β pour des ions de masses comprises entre celle de l'hydrogène et celle du zinc, dans le cas du nitrate de cellulose (avec $I_0 = 2$ eV). Les points expérimentaux, reportés sur les courbes, démontrent l'excellence du choix de $\left(\frac{dI}{dx}\right)_c$, indépendant de la valeur de la charge et de celle de la vitesse, comme critère de développement des traces.

L'emploi de ce critère permet de déterminer quelle est la charge Z minimale de noyaux relativistes pour qu'ils soient enregistrés, ce qui est d'importance primordiale dans l'étude du rayonnement cosmique primaire. On a obtenu, pour des noyaux relativistes :

$Z \geq 32$, dans le cas du nitrate de cellulose orange de type NIXON-BALDWIN,

$Z \geq 35$, dans le cas du nitrate de cellulose clair de type NIXON-BALDWIN,

FIG. 6. — Enregistrement des traces dans le nitrate de cellulose clair du type (NIXON-BALDWIN).

 a) $\frac{dE}{dx}$ en fonction de $\beta = v/c$,

 b) $\frac{dI}{dx}$ en fonction de β
 $\frac{dI}{dx}$ est le seul critère de valeur — H indique = deuteron.

$Z \geq 60$, dans le cas du polycarbonate de cellulose type LEXAN,
 $Z \geq 130$, dans le cas du mica muscovite.

Remarque. Il résulte de ce qui précède que l'emploi pratique des détecteurs solides de traces nécessite de connaître avec la plus grande précision possible, la relation qui existe entre le parcours et l'énergie des ions lourds dans le matériau employé. De nombreux calculs ont porté sur le nitrate de cellulose et le makrofol [Ra-1], [Be-5]. BENTON et HENKE [Be-5] ont vérifié expérimentalement leurs calculs en utilisant des spectromètres de silicium à diffusion de lithium, qui mesuraient l'énergie des particules avant et après la traversée de la feuille de nitrate de cellulose. À titre d'exemple, la figure 7 concerne le nitrate de cellulose et des noyaux ^{12}C , ^{16}O et ^{40}Ar : les points ont été obtenus en mesurant les longueurs des traces développées [Be-5].

FIG. 7. — Relation entre la courbe (parcours-énergie) calculée et les longueurs mesurées des traces développées dans le nitrate de cellulose (pts) - Cas de ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ar [Be-5].

c) Valeur de l'efficacité de détection

Ces mesures confirment globalement ce que je viens de dire. Je citerai quelques exemples, pour des valeurs décroissantes des masses des projectiles.

1. *Fragments de fission*

Dans les matériaux micacés et dans le makrofol, l'efficacité de détection est de 100 % [De-1].

Par contre, dans les verres, les valeurs varient beaucoup d'un auteur à un autre :

- Dans les verres de lamelles de microscopes, DEBEAUVAIS [De-1] a obtenu une efficacité de 0,42.
- Pour les verres photoluminescents au phosphate, KATCOFF [Ka-2] donne 0,60.
- BECKER [Be-2] obtient l'unité à 5 % près pour les verres BOSCH et LAUB, YOKOTA et CEC.

On peut expliquer ces grandes différences par la durée de l'attaque chimique des verres : pour des temps d'attaque élevés, certaines traces disparaissent alors que d'autres prennent de plus en plus la forme de trous circulaires ou elliptiques.

2. *Noyaux lourds*

Les mesures confirment le critère de $\left(\frac{dI}{dx}\right)$. Par exemple, dans le mica, l'efficacité pour les ions Ar de 100 MeV est de 1 [Gi-1], alors qu'elle tombe à 10^{-5} pour les ions d'oxygène de 150 MeV [Pr-3].

3. *Particules α*

Dans le nitrate de cellulose, qui est le polymère le plus sensible, l'efficacité n'est égale à 1 que pour des énergies inférieures à 3 MeV [De-2]. On ne trouve que peu de mesures absolues de l'efficacité, et des statistiques de comptage des traces de particules α dans les matériaux détecteurs [An-1].

4. *Noyaux d'hydrogène*

La figure 6 montre que l'on peut détecter les deutérons par le nitrate de cellulose : leur détection a en effet été prouvée [So-2] à condition qu'on se place au maximum de la courbe de BRAGG.

Par contre, malgré certaines affirmations imprudentes, il a été impossible de déceler les protons, et cela est très regrettable, ne serait-ce que pour la mesure de flux de neutrons rapides.

A titre de curiosité, on peut citer le travail de BEAUJEAN [Be-7] qui a étudié le comportement de nitrate et de polycarbonate de cellulose dans des faisceaux intenses de protons de 0,5 à 1,7 MeV venant d'un VAN de GRAAFF. Le développement fait apparaître des traces de 1 micron de diamètre, analogues à celles de particules α ou d'ions lourds. Il semble que ces traces résultent de l'accumulation de protons; elles peuvent d'ailleurs aussi provenir de noyaux de recul de carbone, et aucune certitude n'a pu être obtenue quant à leur origine.

d) *Angle d'incidence de la particule*

Si θ est l'angle d'incidence de la particule, la détection n'est possible que si θ est inférieur à une valeur critique θ_c [Fl-13], [Fl-14], [Mo-6].

Cette propriété s'explique immédiatement si l'on considère la manière dont le matériau est attaqué. Soit, en effet, v la vitesse d'attaque, par le réactif, du matériau non irradié : v représente la vitesse du front d'attaque perpendiculairement à la surface du détecteur [Mo-7]. Soit V la vitesse d'attaque du réactif le long de la trajectoire de la particule dans le matériau détecteur.

FIG. 8. — Influence de l'angle d'incidence sur le développement des traces, pour $V = 3v$.
a) Incidence normale; b) Incidence oblique.

La situation est résumée sur la figure 8, qui correspond à $V = 3v$: le développement n'est possible que si la projection $V \cos \theta$ de V sur la normale à la surface est supérieure à v . Nous avons donc les conditions de développement :

$$\theta < \theta_c$$

avec $\theta_c = \text{Arc cos} \left(\frac{v}{V} \right)$

Posons $\frac{v}{V} = R$. Le tableau V donne quelques valeurs de R pour les fragments de fission. Dans le cas du zircon et de la labradorite, v est supérieur à V , et tout développement est évidemment impossible.

TABLEAU V

VALEURS DU RAPPORT $R = \frac{v}{V}$ POUR UN CERTAIN NOMBRE DE DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES (FRAGMENTS DE FISSION).

Matériau	R	Matériau	R
Zircon	1,3	Mylar	0,45
Labradorite	1,2	Lexan	0,008
Quartz	0,5	Acétobutyrate de cellulose	0,009
Verre à la chaux sodée	0,4	Nitrate de cellulose	0,02
Mica muscovite	0,05		

Dans les micas, $v \ll V$: toutes les traces sont développées.

Dans les verres, θ_c est, en général, important : 82° pour les verres au phosphate les plus utilisés [Be-2], [Pr-6], 73° pour les verres à la silice [Fl-13], 60° pour les verres à la soude [Fl-12].

Dans les polymères, θ_c varie beaucoup d'un type à un autre. Dans les composés cellulodiques, θ_c est voisin de 55° [De-2]. Dans le lexan et le makrofol, on a obtenu, pour les particules α , $v = 0,01 \mu \text{ m/mn}$ et $V = 0,8 \mu \text{ m/mn}$ [Mo-6], ce qui donne $\theta_c = 89^\circ$.

Remarque

Le pouvoir séparateur du microscope optique introduit une correction sur la valeur de θ_c . En effet, la projection de la trace sur la normale à la surface doit atteindre la longueur minimale x_m (1,5 à 2 microns) correspondant au pouvoir séparateur de l'appareil (voir plus haut, page 64), [So-4].

Soit R_m la longueur maximale de trace révélabile dans les conditions de développement employées :

$$\theta_c = \text{Arc cos} \left[\frac{v}{V} + \frac{x_m}{B_M} \right]$$

Soit R_E le parcours réel de la particule, d'énergie E , dans le matériau du détecteur et R_{Ec} le parcours de cette particule quand elle possède l'énergie critique correspondant au seuil de développement :

$$R_M = R_E \text{ si } R_E \leq R_{Ec}$$

$$R_M = R_{Ec} \text{ si } R_E > R_{Ec}$$

VITESSE D'ATTAQUE V LE LONG DE LA TRAJECTOIRE

Il est important d'étudier en détail les caractéristiques de V et les conséquences à en tirer concernant le mode de détection.

1^o FORME DE LA TRACE DÉVELOPPÉE

Elle est déterminée par les valeurs relatives de v et V (tableau V). Si R est voisin de l'unité, ce qui est le cas des verres, l'attaque donne des cônes largement ouverts. Il en est de même pour des plastiques comme le mylar.

Par contre, si R est très petit, les traces ont un aspect presque cylindrique. Les micas et certains polymères (comme le LEXAN) rentrent dans cette catégorie.

On vérifie ainsi les constatations expérimentales que j'ai données plus haut.

La progression latérale du réactif chimique, dans la matière plastique, conduisant à l'ouverture du cône, est un phénomène directement lié au mécanisme de la détection, dont les lois sont encore assez mal connues. Dans les régions latérales, la vitesse d'attaque est comprise entre V et v et, globalement, la trace s'ouvre d'autant plus que la densité des dommages est plus grande. Si l'on considère des particules peu pénétrantes et une durée de développement constante, le diamètre de la trace à la surface du détecteur est une fonction donnée de l'énergie de la particule à l'entrée du détecteur [Fr-3]. Il y a là un moyen de diagnose encore relativement peu exploité, mais qui semble prometteur. J'y reviendrai plus loin.

Il serait important de consacrer au mécanisme du « rongement » latéral des recherches très détaillées. Il serait bon de calculer le gradient de diffusion du réactif dans les trous, et d'étudier l'interface (liquide-solide) sur les côtés de la trace et au fond de la trace.

2^o VARIATION DE V AVEC LA NATURE DE LA PARTICULE

La figure 5 nous a montré que la vitesse V est beaucoup plus grande dans le cas des fragments de fission que dans celui des particules α . Ce phénomène est tout à fait général : V est d'autant plus grande que la densité des dommages autour de la trajectoire du projectile est plus considérable. V est donc une fonction croissante de la masse et de la charge du projectile; elle est fonction de $\left(\frac{dI}{dx}\right) - \left(\frac{dI}{dx}\right)_c$.

Cette propriété est d'une importance fondamentale dans l'exploitation des données, et elle conditionne le développement futur que l'on peut attendre des détecteurs solides de traces.

3^o VARIATION DU RAPPORT $R = \frac{v}{V}$ EN FONCTION DE PARAMÈTRES EXTÉRIEURS

a) Paramètres chimiques

Nous avons vu plus haut que V varie avec la nature du réactif, sa concentration et la température; je donnerai ici des exemples plus précis.

1. *Concentration du réactif.* Cette question a suscité un grand nombre de publications, de qualité très variable, et l'on constate des désaccords dans un certain nombre de cas. Il serait donc fastidieux et sans intérêt scientifique de

détailler cette question, chaque expérimentateur réglant son mode de développement sur un certain nombre de mesures personnelles, dépendant beaucoup du mode de fabrication des détecteurs, dont les caractéristiques varient bien souvent d'un lot à un autre, dans le cas des matières plastiques tout au moins.

A titre d'exemple, la figure 9 donne la variation de R^{-1} en fonction de la concentration de soude en solution aqueuse ($t = 60^\circ\text{C}$) pour de l'acétate de cellulose, du polycarbonate de cellulose (MELINEX) et du téréphtalate de polyéthylène (MAKROFOL) [So-3], [So-4].

FIG. 9. — Variation de la vitesse d'attaque le long de la trace en fonction de la concentration du réactif (NaOH à 60°C) dans le cas de fragments de fission enregistrés par des matières plastiques [So-4].

2. *Température.* Elle modifie considérablement les vitesses de réaction. En voici quelques exemples :

Sur les micas, l'élévation de la température augmente fortement la vitesse d'attaque : en portant HF (20 %) en solution aqueuse de 20°C à 50°C , on divise le temps d'attaque par 4 dans le cas de la biotite et de la phlogopite naturelle, par 7 dans le cas de la phlogopite artificielle, par 20 dans le cas du mica muscovite.

Dans le cas des verres, nous avons vu que le logarithme de V croît sensiblement linéairement en fonction de la température.

Dans le cas des polymères vrais, on révèle d'autant plus facilement les traces que la température est plus proche du premier point de transition, qui constitue le premier point de décomposition thermique. Lorsque la température est notablement inférieure au point de transition, il est parfois presque impossible d'obtenir un résultat.

3. *Atmosphère lors du développement.* Nous avons vu que le stockage des échantillons irradiés sous oxygène augmente la vitesse V [Mo-10] (page 49).

Le développement chimique peut être considéré comme une oxydation, ce qui explique l'emploi possible d'oxydants forts (permanganate de potassium, bichromate de potassium sulfurique, hypochlorite de sodium, etc.).

Le rôle de l'oxygène y est analogue : il augmente la vitesse de développement. Un exemple est donné sur la figure 10 qui concerne le développement des traces de fragments de fission (^{252}Cf) dans le polycarbonate [Sa-1]. Les traces apparaissent plus vite dans l'air que dans le vide, et leur développement complet est plus rapide. Des résultats analogues ont été obtenus dans le cas du nitrate de cellulose et du mylar.

FIG. 10. — Influence de l'atmosphère (O_2) sur la vitesse de développement des traces de fragments de fission de ^{252}Cf dans le polycarbonate; NaOH 5 N, 55 °C [Sa-1].

On a étudié d'autres atmosphères oxydantes, dont SO_2 , NO et N_2O . CHAVE et MONNIN [Ch-12] ont montré que si l'on plonge du MAKROFOL-E dans l'anhydride sulfureux, donneur d'électrons, on rend la zone de dommages autour de la trace plus réactive que dans le cas où le milieu ambiant est l'air.

b) Paramètres physiques

Les physiciens ont donné libre cours à leur imagination, ainsi que le montrent les exemples qui suivent. L'effet physique, dans certains cas, a pour rôle d'augmenter l'efficacité de l'action du réactif, mais, dans d'autres cas, il peut agir seul.

1. *Étincelle électrique.* La vitesse d'attaque du polycarbonate du type LEXAN par la soude est très augmentée quand l'échantillon a été placé dans une enceinte où règne une décharge électrique du type étincelle [Bl-3]. Les auteurs n'ont pu déterminer s'il y avait un effet électrique direct dû à la décharge, ou si c'était le rayonnement électromagnétique produit par l'étincelle qui agissait. L'expérience était faite dans l'air, l'étincelle crée de l'ozone, dont le rôle oxydant est bien connu et ce gaz peut contribuer à une réaction des espèces gazeuses excitées avec la trace latente; cependant, cet effet se manifeste aussi sous atmosphère inerte.

2. *Rayonnement U.V.* Cette action peut être rapprochée de la précédente. Quand on irradie, en présence d'oxygène, des plastiques (cellulosiques ou polyesters) par des rayons U.V., les angles d'ouverture des cônes sont fortement diminués, ce qui indique une forte augmentation de la vitesse V ; on augmente ainsi la résolution spatiale des événements ionisants [Be-2], [He-2]. L'effet est d'autant moins net que la longueur d'onde du rayonnement U.V. est plus grande [Cr-4].

On peut associer cet effet à l'existence des nouvelles espèces chimiques formées lors de l'irradiation de la matière plastique, ces espèces nouvelles étant

FIG. 11. — Influence des ultra-sons sur le temps de développement des traces des ions ^{12}C dans le nitrate de cellulose dont les deux faces sont attaquées simultanément [Sa-1].

fortement absorbantes pour les rayons U.V. Il en résulte des réactions photo-chimiques qui peuvent être très complexes. En l'absence d'oxygène, les radicaux produits par les réactions se recombinent ou forment des chaînes latérales. Par contre, l'oxygène réagit avec ces radicaux et produit des espèces stables.

c) *Brassage par ultra-sons*. Il joue un rôle purement mécanique, et augmente la vitesse de développement en brassant le réactif et en amenant du produit frais au contact du matériau à attaquer. La figure 11, tirée de [Sa-1] donne l'exemple d'un film de nitrate de cellulose épais de 100 μm , traversé par des noyaux de carbone. La longueur L est la projection de la trace selon la normale à la surface du détecteur. Le détecteur a été attaqué sur ses deux faces : les traces se rejoignent au bout de 23,5 mn sans ultra-sons, et au bout de 17 mn en présence d'un faisceau d'ultra-sons.

Cette question de l'influence des paramètres extérieurs demeure imprécise, quant aux mécanismes et à la reproductibilité des résultats obtenus. Il n'est pas douteux qu'elle va susciter de nombreuses études complémentaires. Il est possible que l'on puisse parvenir, à l'issue de ces études, à des détecteurs de sensibilité plus grande, et réglable à volonté. Il serait intéressant, par exemple, de « sensibiliser » les traces latentes dues aux protons, pour les rendre développables.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ab-1] ABMAYR, D., GRÜNAUER, F. et BURGER, G. *Jourentra*, 1969, p. III-46.
- [Ad-1] ADER, M. *J. Phys. et le Rad.*, 1963, **24**, 574.
- [An-1] ANNO, J., BLANC, D. et TEYSSIER, J.L. *Jourentra*, 1969, p. III-56.
- [Ba-1] BARNES VIRGIL, E. *Sci. Amer.*, 1961, **205**, 58.
- [Ba-2] BAUER, E. *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, 1951, **47**, 777.
- [Ba-3] BAUMGARTNER, W.V., BRACKENBUSH, L.W. et UNRUH, C.M. Symp. Solid and Chemical Radiation Dosimetry, Vienne, 1966.
- [Ba-4] BAUMGARTNER, W.V., BRACKENBUSH, L.W. et UNRUH, C.M. BNWL-SA-516, Health Physics Society Meeting, 1966.
- [Ba-5] BAUMGARTNER, W.V., BRACKENBUSH, L.W. et UNRUH, C.M. Symposium Neutron Monitoring for Radiological Protection, Vienne, 1966; Rapport BNWL-SA-537.
- [Ba-6] BAUMGARTNER, W.V., BRACKENBUSH, L.W. et UNRUH, C.M. Rapport BNWL-332, 1966.
- [Ba-7] BARTHE, J., BLANC, D., COMMANAY, L., FRANCOIS, H., et TEYSSIER, J.L. *Radioprotection*, 1969, **4**, n° 2, p. 109.
- [Be-1] BEAN, C.P., DOYLE, M.V. et ENTINE, G. Cf. [Fl-1].
- [Be-2] BECKER, K. Rapport U.S.N.R.D.L. - TR-904, 1965.
- [Be-3] BECKER, K. First Int. Cong. Int. Rad. Prot. Association, Rome, 1966.
- [Be-4] BESSON, H. « Détecteurs solides », Rapport D.E.A., Clermont-Ferrand.
- [Be-5] BENTON, E.V. et HENKE, R.P. *Nucl. Instr. and Methods*, 1969, **67**, p. 87.
- [Be-6] BENTON, E.V. et HENKE, R.P. *Nucl. Instr. and Methods*, 1969, **70**, p. 183.
- [Be-7] BEAUJAN, R. *Jourentra*, 1969, p. II-119.
- [Be-8] BENTON, E.V. U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, report USNRDL-TR-67-80, 1967, non publié.
- [Be-9] BENTON, E.V. et COLLIVER, M.M. *Health Physics* (1967), vol. **13**, p. 58.
- [Be-10] BENTON, E.V. et HENKE, R.P. *Nucl. Instr. and Methods*, 1968, **58**, p. 241.

Nota : *Jourentra* = Journées internationales d'étude de l'enregistrement des traces de particules chargées dans les solides isolants et leurs applications, laboratoire de Physique Nucléaire de l'Université de Clermont-Ferrand, 6 au 9 mai 1969.

- [~11] BENTON, E.V., HENKE, R.P. et RICHMOND, R.G. *Jourentra*, 1969, p. V-32.
- [Bc-12] BENTON, E.V. *Jourentra*, 1969, p. II-2.
- [Bi-1] BIERLEIN, T.K. et MASTEL, B. *Handford Atomic Products Operation*, 1959, H.W. 61 656 et, 1961, 68 919.
- BIERLEIN, T.K. et MASTEL, B. *J. Appl. Phys.*, 1961, **31**, 2315.
- [Bl-1] BLANFORD, G.E., WALKER, R.M. et WEFEL, J.P. *Jourentra*, 1969, p. III-27.
- [Bl-2] BLOK, J., HUMPHREY, J.S. et NICHOLS, G.E. *Rev. Sci. Instr.*, 1969, **40**, p. 509.
- [Bl-3] BLANFORD, G.E., WALKER, R.M. et WEFEL, J.P. *Jourentra*, 1969, p. II-95.
- [Bl-4] BLANFORD, G.E., WALKER, R.M. et WEFEL, J.P. *Jourentra*, 1969, IV-60.
- [Bo-1] BONFIGLIOLI, G., FERRO, A. et MOJONI, A. *J. Appl. Phys.*, 1961, **32**, 2499.
- [Bo-2] BOWDEN, F.P. et MONTAGU-POLLOCK, H.M. *Nature*, 1961, **191**, 556.
- [Br-1] BRANDT, R., GFELLER, C. et ZAKRZOWSKI, J. Rapport CERN, 1964, 64.
- [Br-2] BRILL, R.H., FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Glass Studies*, 1964, **6**, 151.
- [Br-3] BRILL, R.H., FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et LEAKEY, L.S.B. *Science*, 1965, **148**, 72.
- [Br-4] BRINKMAN, J.A. *Amer. Journ. Phys.*, 1956, **24**, 246.
- [Br-5] BRINKMAN, J.A. *J. Appl. Phys.*, 1954, **25**, 961.
- [Bu-1] BURNETT, D.S., GATTI, R.C., PLASIL, F., PRICE, P.B., SWIATECKI, W.J. et THOMPSON, S.G. *Phys. Rev.*, 1964, **134**, B 952.
- [Ch-1] CHADDERTON, L.T. et MONTAGU-POLLOCK, H.M. *Proc. Roy. Soc., London*, 1963, **239**, A 274.
- [Ch-2] CHADDERTON, L.T. et MAC TORRENS, I., *Nature*, 1964, **203**, 387.
- [Ch-3] CHAPMAN, D.R., et LARSON, H.K. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**, 4305.
- [Ch-4] CHAPMAN, D.R. et LARSON, H.K. *Geoch. Cosmo. Acta*, 1964, **28**, 841.
- [Ch-5] CHAPUIS, A.M. et PORTAL, G. Communication personnelle.
- [Ch-6] CHILDS, C.B. et SLIFKIN, L.M. *IEEE (Inst. Electron. Elec. Engrs.), Trans. Nucl. Sci.*, 1962, **9**, 134.
- [Ch-7] CHILDS, C.B. et SLIFKIN, L.M. *Phys. Rev. Letters*, 1962, **9**, 354.
- [Ch-8] CHILDS, C.B. et SLIFKIN, L.M. *Rev. Sci. Instr.*, 1963, **34**, 101.
- [Ch-9] CHILDS, C.B. et SLIFKIN, L.M. *Proc. Conf. Regist. Particle Tracks in Crystals (Strasbourg, 1963)*.
- [Ch-10] CHILDS, C.B. et SLIFKIN, L.M. 5^e Conf. Int. de la Photog. Corpsec, CERN, 1964, **1**, 1, 1965.
- [Ch-11] CHADDERTON, L.T. « Radiation damage in Crystals » Methuen et Co. London, 1965.
- [Ch-12] CHAVE, A. et MONNIN, M. *Jourentra*, 1969, p. II-102.
- [Ch-13] CHAPUIS, A.M., FRANÇOIS, H. et GERARD-NICODEME, N. *Jourentra*, 1969, p. IX-34.
- [Ci-1] CIELSAK, E., PIEKARZ, J., ZAKRZEWSKI, J., DAKOWSKI, M., PIEKARZ, H. et SOWINSKI, M. *Nucl. Instr. and Methods*, 1966, **39**, 224.
- [Cr-1] CROSS, W.G. et TOMMASINO, L. *Health Physics*, 1967, **13**, 932.
- [Cr-2] TOMMASINO, L. et CROSS, W.G. *Health Physics*, 1968, **15**, 196.
- [Cr-3] CROSS, W.G. et TOMMASINO, L. *Jourentra*, 1969, p. III-73.
- [Cr-4] CRAWFORD, W., DESORBO, W. et HUMPREY, Jr., J.J. *Nature*, 1968, **220**, 1313.
- [Cr-5] CROZAZ, G., HAIR, M., MAURETTE, M. et WALKER, R.M., *Jourentra*, 1969, p. VII-41.
- [Da-1] DAVIES, J.H. et DOMACIL, A.B. *Cf. [Fl-1]*.
- [Da-2] DAVIES, J.H. et ROSEBAUM, H.S., *Cf. [Fl-1]*.
- [Da-3] D'AURIA, J., JODOGNE, J.C., KOWALSKI, L. et MILLER, J.M. *Jourentra*, 1969, p. VIII-41.
- [De-1] DEBEAUVAIS, M., MAURETTE, M., MORY, J. et WALKER, R.M. *Int. J. Appl. Radiation and Isotopes*, 1964, **15**, 289.
- [De-2] DEBEAUVAIS, M. et CUER, P. C.R. Acad. Sci., Paris, 1964, **258**, 1777.
- [De-3] DEBEAUVAIS, M., MULLER, C. et REBSTEIN, E. *Journal de Microscopie*, 1964, **3**, n° 2, 153.
- [De-4] DEBEAUVAIS, M. et MONNIN, M. C.R. Acad. Sci. Paris, 1965, **260**, 4728.
- [De-5] DEBEAUVAIS, M., PROHL, R. et MONNIN, M. C.T. Acad. Sci. Paris, 1965, **261**, 2616.
- [De-6] DEBEAUVAIS, M. et CUER, P. C.R. Acad. Sci. Paris, 1965, **261**, 2633.
- [De-7] DEBEAUVAIS, M., STEIN, R., RALAROS, S. et CUER, P. *Nuclear Physics*, 1966.
- [De-8] DEBEAUVAIS, M. Communication personnelles.
- [De-9] DEBEAUVAIS, M. Communication personnelle.
- [De-10] DEBEAUVAIS, M. et CUER, P. Colloque Electron. Nucl., Toulouse, 1968, Vol. III, p. 43.
- [Di-1] DIENES, G.J. et VINEYARD, G.H. *Radiation effects in solids*. Vol. II, 1957, Interscience Publishers, Inc. N.Y.

- [Du-1] DUFLO-PLISSONNIER, M. Thèse, Paris (communication personnelle).
- [Eπ-1] ENGE, W., MOMO, L.R. et FILZ, R.C. *Jourentra*, 1969, p. II-108.
- [Fi-1] FINCH, C.B., HARRIS, C.A. et CLARK, G.W. *Am. Mineralogist*, 1964, **49**, 782.
- [Fi-2] FIEDLER, G. et HÖPPNER, U. *Jourentra*, 1969, p. IV-35.
- [Fl-1] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**, n° 9, 2903.
- [Fl-2] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *Science*, 1963, **140**, 1221.
- [Fl-3] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Appl. Phys. Letters*, 1963, **3**, 28.
- [Fl-4] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Rev. Sci. Instr.*, 1963, **34**, 510.
- [Fl-5] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. Conf. Enregist. Traces particules dans les cristaux, Strasbourg, 1963.
- [Fl-6] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et HUBBARD, E.L. Proc. Conf. Reactions Complex Nuclei 3 rd 332 !Univ. Calif. Press, Berkeley Calif., 1963.
- [Fl-7] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1964, **28**, n° 6, 755.
- [Fl-8] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1964, **28**, 1705.
- [Fl-9] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., SYMES, E.M. et MILLER, D.S. *Science*, 1964, **143**, n° 3604, 349.
- [Fl-10] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *Science*, 1964, **144**, 841.
- [Fl-11] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *Phys. Rev.*, 1964, **133**, B 63.
- [Fl-12] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et HUBBARD, E.L. *Phys. Rev.*, 1964, **133**, A 1443.
- [Fl-13] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *J. Geophys. Res.*, 1964, **69**, 331.
- [Fl-14] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Geophys. Res.*, **69**, 4885.
- [Fl-15] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et SYMES, E.M. *Amer. Mineralogist*, 1964, **49**, 794.
- [Fl-16] FLEISCHER, R.L. et PRICE, P.B. *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers*, 1964, **76**, 133.
- [Fl-17] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., SYMES, E.M. et MILLER, D.S. *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers*, 1964, **76**, 133.
- [Fl-18] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, U.S.A., 1965, **15**, 1.
- [Fl-19] FLEISCHER, R.L., NAESER, C.W., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et MARVIN, U.B. *Science*, 1965, **148**, 629.
- [Fl-20] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Science*, 1965, **149**, 383.
- [Fl-21] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Applied Physics*, 1965, **36**, 3645.
- [Fl-22] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1965, **29**, 161.
- [Fl-23] FLEISCHER, R.L., NAESER, C.W., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et MAURETTE, M. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**, 1491.
- [Fl-24] FLEISCHER, R.L. et WALKER, R.M. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**, 1497.
- [Fl-25] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Nucl. Sci. Eng.*, 1965, **22**, 153.
- [Fl-26] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. Int. Glass Congr. 7th Bruxelles, 1965, (G.E. Rept. 65-RL-3878 M).
- [Fl-27] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et LEAKEY, L.S.B., *Nature*, 1965, **205**, 1138.
- [Fl-28] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**, 2703.
- [Fl-29] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Rev. Scient. Instr.*, 1966, **37**, 527.
- [Fl-30] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et HUBBARD, E.L. *Phys. Rev.*, 1966, **143**, 943.
- [Fl-31] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M., Cf. [Fl-18].
- [Fl-32] FLEROV, G.N., OGANESYAN, Yu.T., LOBANOV, Yu.V., GAVRILOV, K.A., KUZNETSOV, V.I., DRUIN, V.A., TRETIAKOVA, S.P. et PLOTKO, V.M. *Phys. Letters*, 1964, **13**, 73.
- [Fl-33] FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. et HUBBARD, E.L., *Phys. Rev.*, 1967, **156**, 353.
- [Fo-1] FOWLER, W.A. et HOYLE, F. *Ann. Phys.*, 1960, **10**, 280.
- [Fr-1] FRANÇOIS, H. Communication personnelle.
- [Fr-2] FRANK, A.L. et BENTON, E.V. *Jourentra*, 1969, p. V-84.
- [Fr-3] FRIEDLER, G. et HÖPPNER, U. *Jourentra*, 1969, p. IV-35.
- [Gi-1] GILMAN, J.J., JOHNSTON, W.G. et SEARS, G.W. *J. Appl. Phys.*, 1958, **28**, 747.
- [He-1] HECKMANN, H.H., PERKINS, B.L., SIMON, W.G., SMITH, F.M. et BARKAS, W.H. *Phys. Rev.*, 1960, **117**, 544.
- [He-2] HENKE, R.P., BENTON, E.V. et KECHMAN, H.H. *Jourentra*, 1969, p. I-41.
- [Ho-1] HÖPPNER, U., KONECNY, E. et FIEDLER, G. *Nucl. Instr. and Methods*, 1969, **74**, 285.

- [Hu-1] HURST, G.S., HARTER, J.A., HENSLEY, P.N. et SLATER, M. *Rev. Scient. Instr.*, 1956, **27**, 153.
- [Hu-2] HURST, G.S. et RITCHIE, R.H. 1959, ORNL-2748-A.
- [Iz-1] IZUI, K. et FUJITA, F.E. *J. Phys. Soc. Japan*, 1961, **16**, 1779.
- [Jo-1] JOUSSET, J.C., MORY, J. et QUILLICO, J.J. *Jourentra*, 1969, p. IX-48.
- [Jo-2] JOHNSON, D.R., BOYETT, R.H. et BECKER, K. *Jourentra*, 1969, p. II-46.
- [Ka-1] KATZ, L., BAERG, A.P. et BROWN, F. U.N. Conf. Peaceful Uses Atom. Energy 2nd, Genève, 1958, 15 rapport P. 200, 1958.
- [Ka-2] KATCOFF, S. *Nucleonics*, 1960, **18**, 201.
- [Ka-3] KATZ, R. et KOBETICH, E.J. *Phys. Rev.*, 1968, **170**, 397.
- [Ka-4] KATZ, R. et KOBETICH, E.J. *Phys. Rev.*, 1969, **170**, 401.
- [Ke-1] KELSCH, J.J., KAMMERER, O.F. et BUHL, P.A. *J. Appl. Phys.*, 1960.
- [Ke-2] KELSCH, J.J., KAMMERER, O.F. et BUHL, P.A. *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**, 1475.
- [Ke-3] KERR, G.D., STRICKLER, T.D., *Health Physics*, 1966, **12**, 1141.
- [Ko-1] Von KOENIGSWALD, G.H.R. Kkl. Nederl. Akad. Wetensch. Proc. Ser. B, 1961, **64**, n° 2, 200.
- [Ko-2] KOBETICH, E.J. et KATZ, R. *Phys. Rev.*, 1968, **170**, 391.
- [La-1] LAMBERT, M., LEVELUT, A.M., MAURETTE, M. et HECKMAN, H. *Jourentra*, 1969, p. I-41.
- [La-2] LARK, N.L. *Nucl. Instr. and Methods*, 1969, **67**, 137.
- [La-3] LAUGHLIN, Mac, J.P. *Jourentra*, 1969, p. III-56.
- [Li-1] LINEV, A.F., MARKOV, B.N., PLEV, A.A., POLIKANOV, S.M., Cf. [Fl-18].
- [Ma-1] MAURETTE, M., PELLAS, P. et WALKER, R.M. *Nature*, 1964, **204**, 821.
- [Ma-2] MAURETTE, M., PELLAS, P. et WALKER, R.M. *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.*, 1964, **87**, 6.
- [Ma-3] MAURETTE, M. et WALKER, A.M. *Journal de Physique*, 1964, **25**, 43.
- [Ma-4] MAURETTE, M. et STEPHAN, C. Colloque physique et chimie de la fission, Salzbourg, 1965, SM 60/64.
- [Ma-5] MAURETTE, M. Etudes des traces fossiles dans les minéraux naturels : Thèse Doctorat, Univ. de Paris, 1965.
- [Ma-6] MAURETTE, M. *Journal de Physique*, 1966, **27**, 33.
- [Ma-7] MAGDALENA, E. et MONNIN, M. *Jourentra*, 1969, p. IV-73.
- [Ma-8] MAURETTE, M. *Jourentra*, 1969, p. IV-40.
- [Ma-9] MARSDEN, D.A., JOHANSSON, N.G.E. et BELLAVANCE, G.R. *Nucl. Instr. and Methods*, 1969, **70**, 291.
- [Ma-10] MAURETTE, M. *Jourentra*, 1969, p. I-2.
- [Me-1] MEYERBROEKER, H. *Jourentra*, 1969, p. VI-5.
- [Me-2] MEDVECZKY, L., SOMOGYI, G. et GTZ, G. *Acta Physica Hungarica*, 1969.
- [Me-3] MEDVECZKY, L. *Jourentra*, 1969, p. III-2.
- [Me-4] MEDVECZKY, L., SOMOGYI, G. et VARNAGY, M. Ann. Meeting Eotvos Lorand Phys. Soc. 1967.
- [Mo-1] MORY, J., 1965, Rapport CEA-R-2846.
- [Mo-2] MORGAN, G.R., FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B. et WALKER, R.M., Cf. [Fl-18].
- [Mo-3] MORY, J. Proceedings 5th Intern. Conf. on Nuclear Photography, 1964 (CERN).
- [Mo-4] MORY, J. et WALKER, R.M., 1965, CERN, Suisse, n° 4, Part. II, I-12.
- [Mo-5] MONNIN, M., BESSON, H. et SANZELLE, S. Communication personnelle.
- [Mo-6] MONNIN, M. *Radioprotection*, 1967, II, **2**, 105.
- [Mo-7] MONNIN, M., SANZELLE, S., CHAVE, A. et MENIGOT, M. *Journées d'Electronique, Toulouse*, 1968, tome 3, p. 82.
- [Mo-8] MONNIN, M. *Jourentra*, 1969, p. II-73.
- [Mo-9] MONNIN, M. Colloque franco-allemand, Regensburg, 1966, p. 71.
- [Mo-10] MONNIN, M., BESSON, H. et SANZELLE, S. 4° conf. intern. Photographie corpusculaire, Florence, 1967.
- [No-1] NOGGLE, T.S. et STIEGLER, J.O. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1959, **4**, 141.
- [No-2] NOGGLE, T.S. et STIEGLER, J.D. *J. Appl. Phys.*, 1960, **31**, 2199.
- [Oe-1] O'CEALLAIGH, C. et DALY, J. *Jourentra*, 1969, p. IV-81.
- [Pa-1] PATTERSON, C.C. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1956, **67**, 1821.
- [Pe-1] PERKINS, D.H. Prog. Elem. Particle Hihg Energy Phys., 1961, **5**, 257.
- [Pe-2] PERELYGIN, V.P., TRETIAKOVA, S.P., SHADIEVA, N.H. et CIESLAK, E. *Jourentra*, 1969, p. I-28.
- [Pf-1] PFHOL, R., MONNIN, M. et DEBEAUVAIS, M. C.R. Acad. Sci., Paris, 1965, **261**, 2216.
- [Pi-1] PIESCH, E. *Jourentra*, 1969, p. III-66.

- [Pr-1] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**, 3400.
- [Pr-2] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Appl. Phys.*, 1962, **33**, 3407.
- [Pr-3] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Phys. Letters*, 1962, **3**, 113.
- [Pr-4] PRICE, P.B. et WALKER, R.M., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1962, **7**, 239.
- [Pr-5] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Nature*, 1962, **196**, 732.
- [Pr-6] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Phys. Rev. Letters*, 1962, **8**, 217.
- [Pr-7] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**, 4847.
- [Pr-8] PRICE, P.B. et WALKER, R.M. *Appl. Phys. Letters*, 1963, **2**, 23.
- [Pr-9] PRICE, P.B. et WALKER, R.M., *Bull. Amer. Soc.*, 1963, **8**, 39.
- [Pr-10] PREVO, P., DAHL, R.E. et YOSHIKAWA, H.H. *J. Appl. Phys.*, 1964, **35**, 2636.
- [Pr-11] PRAVDYUCK, N.F. et GOLYANOV, W.M. *Proc. Int. Conf. Berkeley*, 1962, 160 (London Butterworths).
- [Pr-12] PRICE, P.B., FLEISCHER, R.L., PETERSON, D.D., O'CEALLAIGH, C., O'SULLIVAN, D. et THOMPSON, A. *Phys. Rev. Letters*, 1968, **21**, 630.
- [Qu-1] QUERE, Y., RESNEAU, J.C. et MORY, J. C.R. Acad. Sci. Paris, 1966, 262, 1528.
- [Ra-1] RALAROSY, J., SCHMITT, R., MOSINSKI, G., TRIPIER, J., DEBEAUVAIS, M., STEIN, R. et REMY, G. *Journ. Phys.*, 1969, **30**, n° 1, 1.
- [Ro-1] ROMIEU, M. et BLOCH, C.R. *Acad. Sci.*, 1965, **200**, 4194.
- [Ro-2] ROBERTS, J.H. *Jourentra*, 1969, p. IX-53.
- [Ru-1] RUEDI, E., DELAVIGNETTE, P. et AMELINCKX, S. *J. Appl. Phys.*, 1961, **32**, 2492.
- [Sa-1] SANZELLE, S. et MONNIN, M. *Jourentra*, 1969, p. II-127.
- [Sc-1] SCHMITT, R. Rapport Conf. Enregistr. traces particules dans les cristaux, 1963, Strasbourg.
- [Sc-2] SCHULTZ, W.W. *Rev. Sci. Instr.*, 1968, **39**, 1893.
- [Se-1] SEITZ, F. *Discussions Faraday Soc.*, 1949, **5**, 271.
- [Se-2] SEITZ, F. et KOEHLER, J.S. *Displacement of Atoms during irradiations*. Solid State, Physics, Acad. Press (N.Y.), 1956), **2**, 307.
- [Se-3] SEITZ, M., WITTELS, M.C., MAURETTE, M. et WALKER, R.M. *Jourentra*, 1969, p. VII-55.
- [Se-4] SEITZ, M., WITTELS, M.C., MAURETTE, M. WALKER, R.M. et HECKMAN, H. *Journ. Geophys. Research*, 1969.
- [Se-5] SEZON, M. *Jourentra*, 1969. Communication VIII-5.
- [Si-1] SILK, E.C.H. et BARNES, R.S. *Phil. Mag.*, 1959, **4**, 970.
- [Si-2] SIKKELAND, T. et VIOLA, V.E. *Phys. Rev.*, 1962, **128**, 769.
- [Si-3] SIKKELAND, T. *Phys. Rev.*, 1964, **135**, B 669.
- [So-1] SOLDATOV, A.S., SMIRENKIN, G.N., KAPITZA et TSIPENIUK, Y.M. *Phys. Letters*, 1965, **14**, 217.
- [So-2] SOMOGYI, G., VARNAGY, M. et PETO, G. *Nucl. Instr. and Methods*, 1968, **59**, 299.
- [So-3] SOMOGYI, G. et SCHLENK, B. *Jourentra*, 1969, p. VIII-27.
- [So-4] SOMOGYI, G., VARNAGY, M. et MEDVECZKY, L. *Jourentra*, 1969, **1**, p. III-86.
- [So-5] SOMOGYI, G. Atomki Közlemenyek, 1966, **8**, 218.
- [So-6] SOMOGYI, G., SCHLENK, B., BARNAGY, M., MESKO, L. et VALEK, A. *Nucl. Instr. and Methods*, 1968, **63**, 189.
- [St-1] STEIN, R., MOSINSKI, G. et RALAROSY, J. Colloque électronique Nucléaire, Toulouse, 1968, Vol. 3, p. 53.
- [Sw-1] SWARTZ, P.S., FLEISCHER, R.L., HART, H.R. et BEAN, C.P. U.S. Air Force Contract AF-33 (657), 1172, Progr. Rept. NO-2, 1964.
- [Sw-2] SWIATECKI, W.J. et SECOND, U.N. Geneva Conf. Peaceful Uses Atom. Energy (Pergamon London, 1960), rapport P/651, 15, 248.
- [Th-1] THOMAS, J.J. D.E.S., Toulouse, 1968.
- [Th-2] THOMAS, J.J., TEYSSIER, J.L., CHAPUIS, A.M. et FRANCOIS, H. Rapport CEA Bibl. 122, 1968.
- [Tr-1] TRIPIER, J., DEBEAUVAIS, M., STEIN, R., RALAROSY, J. et REMY, G. *Jourentra*, 1969, p. III-14.
- [Wa-1] WALKER, R.M. CERN (Suisse), 1965, **4**, 19.
- [Wh-1] WHAPHAM, A.P. et MCKIN, M.J. *Phil. Mag.*, 1962, **7**, 1441.
- [Wi-1] WIDELL, C.O. *Jourentra*, 1969, p. I-24.
- [Yo-1] YOUNG, D.A. *Nature*, 1968, **182**, 375.
- [Za-1] ZAHNINGER. *Radioactive Dating*, Publ. Intern. Atomic Energy Agency, Vienna, 1963, 289.