

Zonage des Expériences du LEP

FINAL DRAFT

1. Introduction

Les quatre expériences du LEP sont dans leur principe, leur structure ainsi que dans leurs conditions d'opération, très similaires. Il a été décidé de considérer dans cette étude un détecteur type reprenant les caractéristiques (structure et matériaux) et conditions d'opération communes aux quatre expériences. Le zonage d'une expérience type du LEP consiste à séparer les différents sous-détecteurs et assemblages en zones conventionnelles et zones nucléaires. Les zones nucléaires sont les volumes du détecteur contenant ou susceptible de contenir des matériaux nucléaires. Les zones conventionnelles sont les volumes du détecteur ne contenant pas de matériaux nucléaires, c'est à dire des matériaux activés par processus de physique ou l'effet du rayonnement de l'accélérateur.

Un certain nombre de sources radioactives de faible activité, dont la localisation est bien connue, sont utilisées dans les détecteurs. Ces sources seront récupérées lors du démontage et traitées comme matériel TFA. De la même façon, le calorimètre hadronique de L3 qui contient plusieurs tonnes d'uranium appauvri sera traité séparément du reste du détecteur. Le but de ce chapitre est de définir le zonage pour les quatre expériences en excluant les sources et le calorimètre de L3. L'étude qui est à la base du zonage est décrite en détails dans la ref. [1] et seul un résumé est donné ici.

Le zonage est établi sur la base de différents paramètres et informations qui sont développés dans les trois sections suivantes:

- informations concernant la structure des quatre détecteurs du LEP: L3, ALEPH, OPAL et DELPHI,
- hypothèses concernant les sources potentielles d'activité induite,
- calculs d'activité induite sur une base de simulation de type Monte Carlo.

Le zonage est ensuite décrit dans la section 5. Des mesures expérimentales effectuées pendant l'arrêt d'hiver 1999/2000 viennent confirmer le zonage dans la section 6.

2. Structure des détecteurs

Les quatre expériences du LEP ont une structure centrale cylindrique, fermée aux deux extrémités par des parties mobiles (bouchons) contenant elles mêmes des détecteurs. La plupart des composants constituant les détecteurs sont similaires dans les différentes expériences: les aspects communs sont mis en évidence dans cette section et une description complète de chaque détecteur est donnée dans les chapitres suivants de ce rapport.

La partie centrale des expériences est constituée par plusieurs couches elles même composées de détecteurs différents; chacune de ces couches mesure certaines propriétés physiques des particules, ce qui permet de reconstituer les différentes étapes de la collision. Près de ce point de collision, la chambre à vide standard du LEP est remplacée par une section en béryllium de très petite épaisseur (environ 1,2 mm), le béryllium ayant une longueur de radiation inférieure à l'aluminium utilisé pour la chambre à vide dans le reste de l'anneau. La longueur de cette chambre en béryllium est variable selon les expériences mais reste dans tous les cas inférieure à 50 cm. Autour de la chambre à vide on trouve le premier type de détecteur qui matérialise la trajectoire des particules chargées produites par les collisions: celui-ci est appelé Silicon Micro Vertex Detector (SMD). Il est constitué de couches de silicium soutenues par une structure en aluminium et autres matériaux légers.

La couche suivante est différente dans les trois expériences: le principe est dans tous les cas celui d'une chambre à dérive (*drift chamber*) mais les matériaux sont différents selon les expériences. La base commune de cette chambre à dérive est une structure en aluminium ou autres matériaux légers remplie de gaz (Ar et CO₂) avec à l'intérieur des fils de tungstène.

A l'extérieur de cette couche on trouve le calorimètre électromagnétique qui mesure avec précision l'énergie des électrons et des photons. Ce composant est présent dans les quatre expériences bien que constitué de matériaux différents selon les expériences: dans DELPHI et OPAL il contient des blocs de verre au plomb, alors que dans L3 il est constitué de cristaux de BGO et enfin dans ALEPH il s'agit de couches de plomb installées en alternance avec des chambres à fils.

Le calorimètre hadronique constitue la dernière couche; il est en fer dans les expériences ALEPH, DELPHI et OPAL et en uranium appauvri dans L3. Une éventuelle couche extérieure peut être constituée de chambres à fils dédiées à la détection des muons.

De part et d'autre de la partie centrale des expériences on trouve les deux bouchons: ils ont approximativement la même structure que la partie centrale (voir description du calorimètre électromagnétique et du calorimètre hadronique). Des deux cotés des expériences, entre la partie centrale et le bouchon, la première couche à l'extérieur de la chambre à vide est constituée par les « détecteurs en avant »: ils sont appelés STIC dans DELPHI et OPAL, LCAL dans ALEPH et LF dans L3. Ce type de détecteur est formé de cristaux de BGO pour l'expérience L3, alors que pour les autres il a une structure externe en acier et une masse importante interne de plomb.

Cette description n'est pas totalement adaptée à l'expérience L3 pour laquelle les deux bouchons sont remplacés par deux parties mobiles qui se referment sur la partie centrale. De plus, à l'intérieur, un tube de support en acier d'un diamètre de 5 mètres et d'une longueur de 30 mètres contient l'uranium appauvri qui constitue le calorimètre hadronique. La partie du calorimètre hadronique qui se trouve dans les deux bouchons est faite d'un matériau différent de celui de l'élément de la partie centrale qui est en acier inoxydable (couches).

Les derniers éléments qui appartiennent aux expériences sont « les détecteurs très en avant » (VSAT dans L3 et DELPHI, BCAL dans ALEPH, FF dans OPAL). Ils

sont placés après le premier quadripôle, et font donc déjà partie de la section droite du tunnel LEP adjacent aux expériences. Ces éléments ont une composition différente selon les expériences: BGO pour le détecteur de L3, tungstène pour les autres.

3. Sources potentielles d'activité induite

Il y a quatre sources potentielles d'activité induite à prendre en compte:

1. Hadrons issus des collisions $e^+ e^-$
2. Hadrons issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$
3. Diffusion élastique $e^+ e^-$ (Bhabha)
4. Photons et leptons venant du LEP

Les hypothèses sur l'intensité de chacune de ces sources, utilisées pour les calculs Monte Carlo, sont données ci-dessous. Il faut souligner que ces hypothèses sont émises avec une marge de sécurité. Les données pour le fonctionnement de l'année 2000 ont été extrapolées sur la base du fonctionnement en 1999.

3.1 Hadrons issus des collisions $e^+ e^-$

La plus grande partie des collisions $e^+ e^-$ est celle liée à la production du boson Z. La composante hadronique issue des collisions $e^+ e^-$ au centre du chaque détecteur a donc été estimée en prenant en compte la section efficace pour la production des bosons Z et le nombre total de collisions détectées par chaque expérience pendant les deux phases du LEP: la phase LEP1 (fonctionnement à 45 GeV par faisceau entre 1989 et 1995) et LEP2 (80-101 GeV par faisceau entre 1996 et 1999 et prévision à 105 GeV pour l'an 2000). Les estimations donnent 5×10^6 désintégrations hadroniques du Z pendant la phase LEP1, auxquelles il faut ajouter 7×10^5 pour la phase LEP2. On a donc estimé un total de 6×10^6 désintégrations hadroniques pendant les 11 années de fonctionnement du LEP. Chaque désintégration génère 21 particules chargées, dont 17 pions, 2 kaons et un proton, plus des particules neutres, dont 10 pions neutres, 2 kaons neutres et un neutron, avec une impulsion moyenne de 3 GeV/c. Les pions neutres, les muons et les électrons n'ont pas d'importance dans le cadre de cette étude et ont été négligés. Même si la plus grande partie des ces événements a eu lieu pendant la phase LEP1, on a fait l'hypothèse qu'ils se soient distribués de manière relativement égale au cours des 11 ans de fonctionnement des expériences. Cette source est responsable de l'irradiation de l'ensemble du détecteur.

3.2 Hadrons issus des interactions photon-photon provenant des interactions $e^+ e^-$

Une autre source potentielle d'activité induite est représentée par les hadrons issus des interactions photon-photon provenant des interactions $e^+ e^-$. La section efficace totale pour les interactions photon-photon est du même ordre de grandeur que la section efficace pour la production du boson Z au pic de résonance. Cependant, les événements photon-photon déposent beaucoup moins d'énergie dans l'ensemble des détecteurs car les hadrons ont une distribution centrée vers l'avant (*forward peaked*). Leur contribution est négligeable pour LEP1 et doit seulement être prise en compte pour la phase LEP2.

Une estimation de cette composante hadronique a été faite sur la base des simulations effectuées par les collaborations DELPHI et OPAL. L'énergie déposée dans le baril (*barrel*) et dans le bouchon (*endcap*) est très petite; la plupart de l'énergie des hadrons est déposée dans les parties « vers l'avant » (*forward*) des détecteurs. Dans cette étude on a considéré, comme cas représentatif, l'estimation de l'activité induite dans deux détecteurs « en avant » (*forward detectors*) de DELPHI: il s'agit des deux calorimètres du STIC (un de chaque côté du détecteur) irradiés par $2,5 \times 10^6$ hadrons par an, ainsi que du VSAT, irradié par $2,7 \times 10^4$ hadrons par an. Cette composante hadronique est représentée par 70% de pions chargés, 9% de kaons chargés, 9% de kaons neutres, 8% de protons et 4% de neutrons, avec une énergie moyenne de 5 GeV.

3.3 Diffusion élastique $e^+ e^-$ (Bhabha)

La diffusion Bhabha est une diffusion élastique électron/positon à petit angle et elle est surtout importante pour les parties « vers l'avant » des détecteurs. La section efficace de ce phénomène a été estimée pour le moniteur de luminosité Si-W ainsi que pour le moniteur de luminosité « très en avant » (*far-forward detector*) de OPAL. Elle est similaire pour les autres expériences. Les calculs ont montré que le nombre d'électrons et de positons interceptés par ces moniteurs est trois ordres de grandeur inférieur au nombre d'électrons et positons venant du LEP et interceptés par ces mêmes moniteurs. En ce qui concerne l'irradiation de l'ensemble du détecteur, il a aussi été prouvé que l'apport de la diffusion Bhabha est largement inférieur à la composante hadronique estimée dans la section 3.1.

3.4 Photons et leptons venant du LEP

Il y a deux sources de bruit de fond (*background*) dans les détecteurs: les électrons de haute énergie générés par les interactions des faisceaux circulants avec le gaz résiduel dans la chambre à vide du LEP, et le rayonnement synchrotron produit par les derniers dipôles de la section courbe et par les quadripôles de la section droite. Ces deux types de rayonnement provenant du LEP et diffusés dans le détecteur sont en principe des sources potentielles d'activité induite. La cause la plus importante du bruit de fond dans les détecteurs du LEP est représentée par le rayonnement synchrotron, soit direct, soit diffusé, dont l'énergie maximale est de quelques centaines de keV, donc beaucoup trop faible pour pouvoir activer les matériaux. Il a été donc négligé dans cette étude.

L'intensité de la deuxième source, notamment les électrons de haute énergie venant de la machine, a été étudiée pour DELPHI, mais les résultats sont applicables en général aux autres expériences. Ces électrons gravitent très près de la chambre à vide et sont interceptés par les détecteurs « en avant » de l'expérience. On a estimé que les deux calorimètres du STIC ont reçu 5×10^9 électrons par an et 3×10^{10} pour le VSAT. Par prudence, on a fait l'hypothèse que tous ces électrons ont une énergie de 100 GeV.

4. Simulations Monte Carlo et calculs de l'activité induite

Les hypothèses adoptées pour les calculs (valeurs retenues pour les sources et géométrie simplifiée du détecteur et des sous-détecteurs), les simulations Monte Carlo

ainsi que les résultats qui sont à la base du zonage, décrit dans la section 5, sont donnés ci-dessous.

4.1 Résumé des hypothèses adoptées pour le calculs Monte Carlo

Les hypothèses sur les différentes sources retenues pour les calculs Monte Carlo sont résumées ci-dessous.

Calculs pour l'ensemble du détecteur, cas de OPAL:

Hadrons: total pour LEP1 + LEP2: 6×10^6 désintégrations hadroniques du Z pendant les 11 ans de fonctionnement du LEP. Chaque désintégration a la multiplicité suivante: 17 pions chargés, 1 proton, 1 neutron, 2 kaons chargés, 2 kaons neutres (pions neutres, muons et électrons ont été négligés), avec une impulsion de 3 GeV/c.

Calculs pour les détecteurs « en avant », cas du BCAL de ALEPH, du STIC et du VSAT de DELPHI, du VSAT et du LF de L3:

Électrons venant du LEP:

DELPHI STIC: 5×10^9 électrons/an depuis 1994 (date d'installation du STIC dans DELPHI), énergie 100 GeV

DELPHI VSAT: 3×10^{10} électrons/an depuis 1989, énergie 100 GeV

ALEPH BCAL: 3×10^{10} électrons/an depuis 1997 (date d'installation du BCAL dans ALEPH), énergie 100 GeV

L3 VSAT: 3×10^{10} électrons/an depuis 1996, énergie 100 GeV

L3 LF: 5×10^9 électrons/an depuis 1989, énergie 100 GeV

Hadrons issus des interactions photon-photon provenant des interactions $e^+ e^-$ pour LEP2:

DELPHI STIC: $2,5 \times 10^6$ hadrons/an sur chaque calorimètre du STIC depuis 1996 (début de la phase LEP2). La composition de ces hadrons est: 70% de pions chargés, 9% de kaons chargés, 9% de kaons neutres, 8% de protons et 4% de neutrons, avec une énergie moyenne de 5 GeV

DELPHI VSAT: $2,7 \times 10^4$ hadrons/an depuis 1996 (début de la phase LEP2), avec la même composition et la même énergie moyenne que dans le cas du STIC

ALEPH BCAL: $2,7 \times 10^4$ hadrons/an depuis 1997 (date de l'installation de BCAL dans ALEPH), avec la même composition et la même énergie moyenne que dans le cas du STIC. La position du BCAL est à peu près la même que celui de VSAT dans DELPHI, mais la couverture angulaire est seulement de 80° sur 360°

L3 VSAT: $2,7 \times 10^4$ hadrons/an depuis 1996 (début de la phase LEP2), avec la même composition et la même énergie moyenne que dans le cas du STIC

L3 LF: $2,5 \times 10^6$ hadrons/an depuis 1996 (début de la phase LEP2), avec la même composition et la même énergie moyenne que dans le cas du STIC

Pour le temps annuel d'irradiation et pour l'accumulation (*build-up*) de la radioactivité induite on a fait les mêmes hypothèses que pour l'étude qui a amené au zonage de la machine LEP, c'est à dire un fonctionnement de 6 mois ($1,5 \times 10^7$ secondes) par an suivi par un arrêt de 6 mois. L'hypothèse émise sur le temps annuel d'opération est, par prudence, surévalué. Les valeurs d'activité spécifique données dans le chapitre suivant sont calculées à la fin des 11 années de fonctionnement du LEP (1990-2000), c'est à dire au 30 septembre 2000, juste avant le début du démontage.

Tous les radionucléides dont la demi-vie est supérieure à 24 heures ont été considérés dans les calculs, y compris ceux qui n'émettent aucun gamma (par exemple le ^{55}Fe). Seuls les radionucléides dont l'activité spécifique était la plus importante ont été pris en compte et sont indiqués dans les tableaux de la section 4.3; la contribution de ceux qui n'y apparaissent pas était beaucoup plus faible.

4.2 Simulations Monte Carlo

Les simulations ont été faites avec FLUKA [2,3], un code Monte Carlo qui permet d'évaluer les cascades hadronique et électromagnétique dans la matière; ce code gère également les interactions entre les deux cascades, c'est à dire les interactions photonucléaires. L'option utilisée pour les simulations est le RESNUCLEI qui donne directement les noyaux résiduels produits par les interactions inélastiques. Cette même option a été utilisée précédemment pour déterminer l'activité induite dans les matériaux du LEP: dans cette étude une bonne concordance avait été obtenue entre les mesures effectuées et les résultats des simulations [4,5].

L'activité spécifique pour chaque radionucléide a été obtenue en multipliant les résultats des simulations (normalisés par particule incidente sur le composant) par le nombre total de particules (nombre d'électrons ou de hadrons estimés pour chaque cas comme décrit précédemment), et en les divisant par la masse de l'objet. Les résultats ont été anticipés à la date de fin de fonctionnement du LEP en septembre 2000 ainsi qu'en prenant en compte les différentes dates d'installation de chaque élément et en calculant l'accumulation de la radioactivité. Chaque cas a été traité en 5 simulations recevant 20000 particules chacune; ainsi, l'erreur statistique pour la plupart des isotopes était inférieure à 10%. Dans les simulations, seuls les matériaux prépondérants ont été pris en compte et les éventuelles traces ont été négligées (par exemple, les 3,75% de nickel et les 3,75% de fer dans le tungstène de détecteur BCAL ont été négligés).

Les calculs de l'activité induite dans l'ensemble du détecteur ont été faits pour l'expérience OPAL, représentée en géométrie sphérique à la place de la géométrie cylindrique, ceci afin d'augmenter la statistique, c'est à dire diminuer le temps requis par les simulations. Le détecteur a été schématisé comme une sphère composée de plusieurs couches concentriques: une couche de béryllium d'une épaisseur de 2 mm (radius entre 5,3 et 5,5 cm) représentant la chambre à vide, les chambres à fils (dimension radiale entre 5,5 et 250 cm) représentées par de l'air car elle sont pour la plupart constituées de gaz, une couche de verre au plomb d'épaisseur comprise entre 250 et 300 cm (le calorimètre électromagnétique) et une couche de fer de 300 à 450 cm (le calorimètre hadronique).

La radioactivité qui peut être induite dans les détecteurs « en avant » a été calculée pour les composants mentionnés ci-dessus: le STIC et le VSAT de DELPHI, le BCAL de ALEPH, et enfin le VSAT et le LF de L3. Les simulations ont été effectuées séparément pour les électrons et les hadrons et les valeurs d'activité spécifique additionnées. Dans les calculs concernant la composante hadronique seuls les pions chargés ont été considérés, et ceci pour deux raisons:

- 1) ils constituent la fraction prépondérante des hadrons (70%),
- 2) les résultats présentés dans la section suivante, montrent que les valeurs d'activité induite dues à cette composante sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à celles dues aux électrons.

Les détecteurs « en avant » pris en compte dans cette étude (le STIC de DELPHI et le LF de L3), ont une géométrie similaire: ils ont été assimilés à des anneaux cylindriques ayant un rayon interne de 5,8 cm et un rayon externe respectivement de 42 cm et de 80 cm. La longueur est de 14,1 cm pour le STIC et de 50 cm pour le LF. Les faisceaux de particules utilisés dans les simulations sont des anneaux de 8,4 cm de rayon interne et de 39 cm de rayon externe, ce qui reproduit approximativement la surface réelle des deux détecteurs intéressés par l'irradiation directe. A l'intérieur du détecteur, la chambre à vide a été considérée toujours en géométrie cylindrique sur une épaisseur de 0,5 cm d'aluminium. Le détecteur STIC de DELPHI est constitué de plomb tandis que le LF de L3 est constitué de cristaux de BGO.

Les détecteurs « très en avant » des trois expériences (le VSAT de DELPHI et de L3, ainsi que le BCAL de ALEPH) sont des composants plus petits par rapport aux détecteurs « en avant ». Pour simplifier la simulation des deux VSAT, ils ont été considérés comme des cylindres solides ayant un volume correspondant à la surface du composant réel qui est frappée par le faisceau. Le VSAT de DELPHI est un cylindre de 5 cm² de surface et 8,4 cm de longueur constitué de tungstène, tandis que le VSAT de L3 est un cylindre ayant la même surface que le précédent mais d'une longueur de 20 cm et qui est constitué de BGO. Le BCAL de ALEPH a été simulé en géométrie réelle pour mieux comparer les résultats avec les mesures de spectrométrie gamma. Il s'agit donc d'un anneau cylindrique de rayon interne 6,8 cm et rayon externe 10,8 cm constitué de 30 couches de tungstène de 3,72 mm d'épaisseur chacune, ce qui correspond à une longueur totale de 11,2 cm (la longueur totale réelle est presque le double à cause des couches de scintillateur plastique alternées avec les couches de tungstène; le scintillateur plastique a une très faible densité et n'a par conséquent pas été pris en compte).

Un certain pourcentage des particules prévues par les simulations n'interagissent pas dans les composants mais s'échappent du système. En moyenne, ce pourcentage est entre 10% et 20% pour le cas électromagnétique tandis que les valeurs montent à 70-80% pour la composante hadronique (pions chargés). Les particules qui s'échappent peuvent frapper les matériaux qui entourent le composant considéré, où peuvent déposer leur énergie, en produisant éventuellement de l'activité induite. En ce qui concerne la composante électromagnétique, il a été décidé de la négliger compte tenu du faible pourcentage de particules qui s'échappent du système. Pour la composante hadronique, les résultats montrent des valeurs d'activité induite si basses qu'une investigation supplémentaire n'est pas justifiée.

4.3 Résultats

Les valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides dans les matériaux constituant la chambre à vide, le calorimètre électromagnétique et le calorimètre hadronique de OPAL sont données dans le tableau 1. Compte tenu des valeurs insignifiantes de l'activité spécifique, il a été jugé inutile de répéter les simulations pour des autres matériaux, y compris les différents types de gaz utilisés dans certains sous-détecteurs des autres expériences.

Les valeurs d'activité spécifique dans les matériaux constituant les détecteurs « en avant » sont données dans les tableaux 2 à 6 respectivement pour le STIC et le VSAT de DELPHI, le BCAL de ALEPH, le VSAT et le LF de L3. Les valeurs sont données séparément pour l'activité spécifique induite par les électrons et par les hadrons. Les valeurs pour la composante hadronique se réfèrent seulement à la contribution des pions chargés. Pour les détecteurs « en avant » (le STIC de DELPHI et le LF de L3) l'activité spécifique pour tous les radionucléides est inférieure ou égale au milliBecquerel par gramme. Pour les détecteurs « très en avant » la situation est légèrement différente. Dans le BCAL de ALEPH les valeurs pour tous les radionucléides sont inférieures ou égales au milliBecquerel par gramme sauf pour le ^{185}W pour lequel l'activité spécifique atteint un dixième de Becquerel par gramme. Pour le VSAT de DELPHI et de L3 l'activité spécifique est, pour la plupart des radionucléides, inférieure à un dixième de Becquerel par gramme, et elle peut atteindre quelques Becquerel par gramme mais seulement pour quelques radionucléides (notamment le ^{181}W , le ^{185}W et le ^{71}Ge). Dans la chambre à vide en aluminium de chaque détecteur on trouve seulement du ^3H , ^7Be et ^{22}Na , pour lesquels les activités spécifiques sont du même ordre que dans le reste du détecteur.

5. Zonage des expériences

Le zonage des expériences est basé sur les résultats des calculs donnés dans la section 4. D'après les calculs le zonage établi pour les quatre détecteurs est le suivant.

Vu les valeurs insignifiantes d'activité spécifique dans la masse des détecteurs (inférieures au nanoBecquerel par gramme) et dans les détecteurs « en avant » situés à l'intérieur du bouchon et tout près de la chambre à vide (inférieur ou égal au milliBecquerel par gramme), les quatre expériences sont considérées comme étant non actives. Il est évident que si l'ensemble de détecteur ne présente aucune trace d'activité induite, il en est de même pour les matériaux qui l'entourent, tels que les salles de comptage situées sur les cotés et au-dessus, la tuyauterie et tous les équipements auxiliaires.

Pour les moniteurs « très en avant » (le VSAT de DELPHI, le BCAL de ALEPH, le VSAT de L3 et le FF de OPAL), situés aux deux extrémités des expériences après les quadripôles supraconducteurs (c'est à dire, dans la machine LEP) les calculs ont montrés que pour quelques radionucléides l'activité spécifique pouvait dépasser la valeur de 1 Bq/g. Ces composants sont classés par prudence comme TFA. Ces moniteurs sont installés à l'extérieur des détecteurs, dans une zone de la machine LEP où on trouve déjà des éléments classés TFA, et ils seront donc traités comme tel avec le reste du matériel provenant de cette zone du LEP.

6. Mesures de confirmation

Pendant l'arrêt d'hiver 1999/2000 des mesures radiologiques ont été effectuées à l'intérieur des bouchons des expériences ALEPH et DELPHI, sur quelques sous-détecteurs démontés de ALEPH, ainsi que sur de la visserie provenant de la zone du bouchon de DELPHI, de L3 et de ALEPH [6] (des mesures radiologiques à l'intérieur du bouchon de L3 n'avaient pas de sens compte tenu du bruit de fond engendré par l'uranium appauvri du calorimètre hadronique).

Des mesures de débit de dose effectuées à l'aide d'un appareil portable type IPAB équipé d'une sonde de mesure très sensible (scintillateur plastique NaI) à l'intérieur de ALEPH et DELPHI ont montré un débit de dose respectivement 4 et 6-7 fois inférieur au bruit de fond naturel en surface. Des mesures de débit de dose effectuées sur des modules de type SICAL, BCAL et LCAL démontés de ALEPH ont montré un débit de dose du même ordre que le bruit de fond naturel (et deux fois plus bas à l'intérieur du LCAL).

Des mesures de spectrométrie gamma ont été effectuées avec un détecteur EG&G Ortec HPGe portable dans le bouchon de DELPHI et de ALEPH, à proximité de la chambre à vide, pendant environ 24 heures. A DELPHI seuls des radionucléides naturels ont été détectés (^{40}K ainsi que les isotopes des chaînes de l' ^{238}U et du ^{232}Th), tandis qu'à ALEPH de légères traces de ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co et ^{182}Ta ont été décelées en plus des radionucléides naturels mentionnés ci-dessus. Ces mesures ont été effectuées dans un bruit de fond naturel non négligeable (absence de blindage autour de la diode) et sont donc seulement qualitatives.

Des mesures qualitatives de spectrométrie gamma ont aussi été faites sur trois modules des détecteurs « en avant » BCAL, LCAL et SICAL démontés de ALEPH, avec le détecteur portable EG&G Ortec HPGe. Les mesures de spectrométrie ont été effectuées sur la partie des modules la plus proche à la chambre à vide, pendant environ 24 heures. Seuls des radionucléides naturels ont été détectés sur SICAL, tandis que la mesure sur BCAL a montré de légères traces de ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{60}Co (enveloppe en acier) et ^{182}Ta (composants électroniques). Pour le LCAL la spectrométrie a été effectuée à l'intérieur du module, c'est à dire avec un bon blindage par rapport au bruit du fond ambiant (la mesure à l'IPAB donnait à l'intérieur un débit de dose deux fois plus bas par rapport à l'extérieur). En plus des radionucléides naturels, le résultat de la mesure a permis de mettre en évidence des traces de ^{124}Sb (plomb du calorimètre).

Des mesures quantitatives de spectrométrie gamma ont été faites au laboratoire avec un détecteur Eurisys Mesures HPGe, sur de la visserie en acier prélevée à l'intérieur des bouchons des expériences DELPHI, L3 et ALEPH, ainsi que sur un tuyau en laiton provenant du bouchon de L3. Les temps d'acquisition pour ces différentes mesures sont compris entre 17 et 26 heures. Aucun radionucléide naturel ou artificiel n'a été détecté. Les limites de détection pour les isotopes artificiels les plus probables sont de 25-40 mBq/g pour le ^{54}Mn , ^{57}Co et ^{58}Co et de 0,2-0,3 Bq/g pour le ^{51}Cr (DELPHI), entre 60 et 90 mBq/g pour le ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co et ^{60}Co et 0,1-0,2 Bq/g pour le ^{65}Zn (L3). La visserie provenant de ALEPH était constituée

seulement de deux petits vis dont la masse totale était inférieure à 4 g; pour cette raison la limite de détection se situe autour de 1 Bq/g.

Les résultats des ces mesures sont cohérents avec les calculs. Les niveaux d'activité induite estimés dans les composants situés dans la zone du bouchon (le STIC du DELPHI et le LF de L3) sont inférieurs ou égaux au milliBecquerel par gramme, ce qui est compatible avec le très faible signal donné par la spectrométrie gamma faite sur 24 heures. Cette même conclusion s'applique aux moniteurs « très en avant » (le VSAT de DELPHI, le BCAL de ALEPH et le VSAT de L3) situés dans la machine LEP aux deux extrémités des expériences, après les quadripôles supraconducteurs. Ces composants ont été classés par prudence comme TFA, mais les activités de la plupart des radionucléides estimées par les simulations Monte Carlo sont très faibles, ce qui est confirmé par les mesures.

Références

- [1] B. Bloch-Devaux, V. Hedberg, M. Silari, L. Ulrici et P. Wells, Induced activity in the LEP experiments, Internal Report CERN TIS-RP/IR/2000-01 (2000).
- [2] A. Fassò et al., New developments in FLUKA modelling of hadronic and EM interactions, Proceedings of the Third Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE3), KEK, Tsukuba, Japan, Ed. H. Hirayama, KEK Proceedings 97-5, p. 32 (1997).
- [3] A. Ferrari, T. Rancati. et P.R. Sala, Fluka applications in high-energy problems: from LHC to ICARUS and atmospheric showers, Proceedings of the Third Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE3), KEK, Tsukuba, Japan, Ed. H. Hirayama, KEK Proceedings 97-5, p. 165 (1997).
- [4] A. Fassò, M. Silari et L. Ulrici. Predicting induced radioactivity at high-energy electron accelerators. Proceedings of the Ninth International Conference on Radiation Shielding, Tsukuba (Japan), 17-22 October 1999 (in press).
- [5] M. Silari, L. Ulrici et S. Ye, On the estimation of low levels of induced radioactivity in LEP, Rapport Interne CERN TIS-RP/IR/99-13 (1999).
- [6] N. Conan, Y. Donjoux et L. Ulrici, Mesures de la radioactivité induite dans les expériences DELPHI, ALEPH et L3, Technical Memorandum CERN TIS-RP/TM/2000-02 (2000).

Tableau 1. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les hadrons issus des collisions $e^+ e^-$ dans les matériaux constituant la chambre à vide, le calorimètre électromagnétique et le calorimètre hadronique d'une expérience-type du LEP (OPAL).

Activité spécifique dans le béryllium de la chambre à vide en unité de 10^{-7} Bq/g	
^7Be	^3H
9,6	14,1

Activité spécifique dans le vitre plombé du calorimètre électromagnétique en unité de 10^{-11} Bq/g																			
^7Be	^{147}Eu	^{170}Lu	^{178}W	^{175}Hf	^{177}Ta	^{188}Pt	^{181}W	^{183}Re	^{185}Os	^{188}Ir	^{189}Ir	^{191}Pt	^{195}Au	^{197}Hg	^{201}Tl	^{203}Pb	^{205}Bi	^{202}Tl	^{206}Bi
18,0	1,2	1,9	5,1	1,5	3,2	4,7	3,1	6,1	8,3	4,7	5,0	5,5	6,9	17,2	28,2	36,4	2,3	11,1	1,8

Activité spécifique dans le fer du calorimètre hadronique en unité de 10^{-12} Bq/g											
^{37}Ar	^{44}Sc	^{48}V	^{52}Mn	^{56}Co	^{49}V	^{51}Cr	^{55}Fe	^{46}Sc	^{54}Mn	^{47}Sc	^{59}Fe
0,80	3,5	19,7	27,3	2,9	18,5	73,2	295	1,5	95,9	0,9	18,2

Tableau 2. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les électrons (E) venant du LEP, ainsi que par les hadrons (H) issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$ dans le détecteur STIC de DELPHI.

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur STIC de DELPHI (Bq/g)															
	^{146}Eu	^{147}Eu	^{149}Gd	^{149}Eu	^{151}Gd	^{153}Tb	^{169}Lu	^{170}Lu	^{167}Tm	^{169}Yb	^{171}Lu	^{178}W	^{175}Hf	^{182}Re	^{188}Pt
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$
H	$1,9 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$0,9 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$4,6 \times 10^{-9}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur STIC de DELPHI (Bq/g)															
	^{179}Ta	^{181}W	^{183}Re	^{185}Os	^{188}Ir	^{189}Ir	^{191}Pt	^{195}Hg	^{195}Au	^{197}Hg	^{201}Tl	^{203}Pb	^{205}Bi	^{202}Tl	^{206}Bi
E	—	—	$2,2 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$8,8 \times 10^{-4}$	—
H	$3,3 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-9}$	$4,7 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-9}$	$6,2 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-9}$

Tableau 3. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les électrons (E) venant du LEP, ainsi que par les hadrons (H) issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$ dans le détecteur VSAT de DELPHI.

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur VSAT de DELPHI (Bq/g)																
	^{146}Gd	^{145}Eu	^{140}Nd	^{146}Eu	^{145}Sm	^{147}Eu	^{149}Gd	^{149}Eu	^{151}Gd	^{153}Tb	^{153}Gd	^{155}Tb	^{166}Yb	^{159}Dy	^{169}Lu	^{170}Lu
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$3,0 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-2}$
H	$3,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-9}$	$6,8 \times 10^{-8}$	$4,2 \times 10^{-8}$	$9,7 \times 10^{-8}$	$5,4 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$4,6 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$4,9 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-8}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur VSAT de DELPHI (Bq/g)																
	^{172}Hf	^{167}Tm	^{169}Yb	^{171}Lu	^{172}Lu	^{178}W	^{173}Lu	^{175}Hf	^{177}Ta	^{182}Re	^{179}Ta	^{181}W	^{183}Re	^{182}Ta	^{183}Ta	^{185}W
E	—	—	$3,0 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	—	$2,3 \times 10^{-1}$	—	$8,4 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-1}$	—	$1,8 \times 10^{-1}$	2,4	—	—	$3,0 \times 10^{-2}$	10,0
H	$3,4 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-8}$	$8,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-9}$	$8,9 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-7}$

Tableau 4. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les électrons (E) venant du LEP, ainsi que par les hadrons (H) issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$ dans le détecteur BCAL de ALEPH.

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur BCAL de ALEPH (Bq/g)															
	^{146}Gd	^{145}Eu	^{146}Eu	^{145}Sm	^{147}Eu	^{149}Gd	^{149}Eu	^{151}Gd	^{153}Tb	^{153}Gd	^{155}Tb	^{166}Yb	^{159}Dy	^{169}Lu	^{170}Lu
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$4,0 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$
H	$5,2 \times 10^{-10}$	$3,2 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$6,5 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$9,1 \times 10^{-10}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$9,7 \times 10^{-10}$	$8,8 \times 10^{-10}$	$5,2 \times 10^{-10}$	$4,3 \times 10^{-10}$	$9,0 \times 10^{-10}$	$3,1 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur BCAL de ALEPH (Bq/g)															
	^{172}Hf	^{167}Tm	^{169}Yb	^{171}Lu	^{172}Lu	^{178}W	^{173}Lu	^{175}Hf	^{177}Ta	^{179}Ta	^{181}W	^{183}Re	^{182}Ta	^{183}Ta	^{185}W
E	—	—	$4,0 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	—	$2,9 \times 10^{-3}$	—	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-2}$	—	—	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-1}$
H	$6,7 \times 10^{-10}$	$9,0 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$3,7 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-9}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$7,8 \times 10^{-10}$	$9,9 \times 10^{-10}$	$9,8 \times 10^{-9}$

Tableau 5. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les électrons (E) venant du LEP, ainsi que par les hadrons (H) issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$ dans le détecteur VSAT de L3.

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur VSAT de L3 (Bq/g)															
	^7Be	^{51}Cr	^{58}Co	^{65}Zn	^{67}Ga	^{68}Ge	^{69}Ge	^{71}Ge	^{146}Gd	^{146}Eu	^{147}Eu	^{149}Gd	^{149}Eu	^{151}Gd	^{153}Tb
E	—	—	—	—	$6,2 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-1}$	1.2	—	—	—	—	—	—	—
H	$1,0 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-9}$	$4,7 \times 10^{-9}$	$8,4 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-8}$	—	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$9,1 \times 10^{-9}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur VSAT de L3 (Bq/g)														
	^{155}Tb	^{166}Yb	^{169}Lu	^{170}Lu	^{167}Tm	^{169}Yb	^{171}Lu	^{178}W	^{175}Hf	^{177}Ta	^{182}Re	^{188}Pt	^{179}Ta	^{181}W
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$3,2 \times 10^{-2}$	—	—	—
H	$5,2 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$6,1 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,7 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur VSAT de L3 (Bq/g)															
	^{183}Re	^{185}Os	^{188}Ir	^{189}Ir	^{191}Pt	^{195}Hg	^{195}Au	^{197}Hg	^{206}Po	^{201}Tl	^{203}Pb	^{205}Bi	^{202}Tl	^{206}Bi	^{207}Bi
E	—	—	—	—	—	$2,7 \times 10^{-2}$	—	$9,9 \times 10^{-2}$	—	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$	—	$6,7 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$
H	$3,8 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$6,6 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$6,1 \times 10^{-9}$	$4,8 \times 10^{-8}$	—

Tableau 6. Valeurs d'activité spécifique des différents radionucléides produits par les électrons (E) venant du LEP, ainsi que par les hadrons (H) issus des interactions photon-photon issues des interactions $e^+ e^-$ dans le détecteur LF de L3.

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur LF de L3 (Bq/g)											
	^7Be	^{65}Zn	^{67}Ga	^{68}Ge	^{69}Ge	^{71}Ge	^{146}Eu	^{147}Eu	^{149}Eu	^{170}Lu	^{178}W
E	—	—	$7,1 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-7}$	$9,9 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-5}$	—	—	—	—	—
H	$3,8 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$2,1 \times 10^{-10}$	$2,7 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-10}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur LF de L3 (Bq/g)											
	^{177}Ta	^{182}Re	^{188}Pt	^{181}W	^{183}Re	^{185}Os	^{188}Ir	^{189}Ir	^{191}Pt	^{195}Hg	^{195}Au
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H	$3,9 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-10}$	$7,7 \times 10^{-10}$	$9,7 \times 10^{-10}$	$6,1 \times 10^{-10}$	$5,3 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-10}$	$9,1 \times 10^{-10}$	$6,2 \times 10^{-10}$

Activité spécifique due aux électrons (E) et aux hadrons (H) dans le détecteur LF de L3 (Bq/g)										
	^{197}Hg	^{206}Po	^{201}Tl	^{203}Pb	^{205}Bi	^{202}Tl	^{206}Bi	^{207}Bi	^{210}Po	^{210}Bi
E	$1,7 \times 10^{-6}$	—	$2,3 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$	—	$1,2 \times 10^{-5}$	$8,3 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$
H	$3,1 \times 10^{-9}$	$3,8 \times 10^{-10}$	$4,1 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-9}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-9}$	—	$6,1 \times 10^{-9}$	$9,1 \times 10^{-9}$

