

Etude de Zonage Déchets de l'Accélérateur LURE

M. Cometto, F. Damoy, M. L. Giacri-Mauborgne, D. Ridikas, W. Thomas

CEA Saclay, DSM/DAPNIA, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

E-mail: ridikas@cea.fr

1. OBJET DU DOCUMENT

Le but de ce document est de montrer la validité des calculs d'activation sur les éléments de structure de l'accélérateur LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique) situé à Orsay (Essonne).

Cet accélérateur permet la production de rayonnement synchrotron pour des domaines très divers de recherche : la physique représentait 41% des projets, la chimie 27%, la biologie et les sciences de l'environnement 15%, les micro fabrications et la lithographie 7%, l'astrophysique 5%, enfin les usages industriels 5%. Un faisceau d'électrons traverse un convertisseur pour obtenir des positrons à partir desquels est produit le rayonnement synchrotron. Dans ce document on s'intéresse à la radioactivité créée par ce faisceau d'électrons au niveau du **convertisseur** et de la **section 8**.

Ce document décrit la démarche suivie pour le calcul de l'activation de l'environnement du convertisseur et de l'IRIS, appelé aussi section 8. La validation est effectuée grâce à la comparaison entre les résultats des calculs et l'activité détectée sur des carottes prélevées au niveau du convertisseur et de la section 8.

2. DEMARCHE ADOPTEE POUR LE CALCUL D'ACTIVATION

Le calcul de l'activation de l'accélérateur du LURE est effectué en deux étapes distinctes représentées en jaune dans la figure 1. Dans la première étape on effectue un calcul de flux « classique ». Cela permet de déterminer la distribution du flux de neutrons et de photons sur la globalité de l'environnement susceptible d'avoir été activé. Dans la deuxième étape, le flux précédemment calculé est utilisé, conjointement à l'historique d'irradiation et de décroissance et à la composition isotopique des matériaux, pour déterminer l'activité des différents matériaux en fonction du temps et de leur position. En cas de doute sur les données lors du calcul d'activation on a toujours adopté l'attitude la plus pénalisante. C'est à dire que l'on a choisi de simuler l'hypothèse qui créerait la plus grande activité.

Les calculs de flux ont été effectués par l'intermédiaire du code probabiliste MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended), développé au laboratoire de Los Alamos (USA) [1]. La méthode Monte Carlo consiste à simuler de manière statistique les événements qui peuvent se produire dans un environnement donné. La simulation du parcours et des interactions d'un grand nombre de particules indépendantes permet d'en déterminer la distribution en espace et en énergie avec une incertitude connue.

L'utilisation d'une méthode probabiliste permet de décrire l'énergie de façon continue en s'affranchissant ainsi des approximations induites par le découpage du domaine énergétique en un

nombre fini de sous-groupes. Un autre avantage important des méthodes Monte Carlo est représenté par la souplesse de la description de la géométrie du système à traiter : il est ainsi possible de décrire en 3D des structures même très complexes.

Le code MCNPX permet d'accéder aux données nucléaires des trois bibliothèques principales, ENDF, JEF et JENDL. Pour les calculs neutroniques on a utilisé la bibliothèque ENDF/B-VI comme référence. Les données nucléaires des isotopes absents dans la librairie de référence ont été remplacées par les évaluations de la bibliothèque JENDL 3.2 ou ENDF/B-V. Pour les calculs photoniques nous avons utilisé la bibliothèque évaluée de l'IAEA.

Pour tester la précision du code MCNPX, on a simulé quelques cas-tests. Les résultats obtenus ont été comparés à des résultats expérimentaux ou à d'autres simulations indépendantes. Ces comparaisons sont présentées au paragraphe 4.

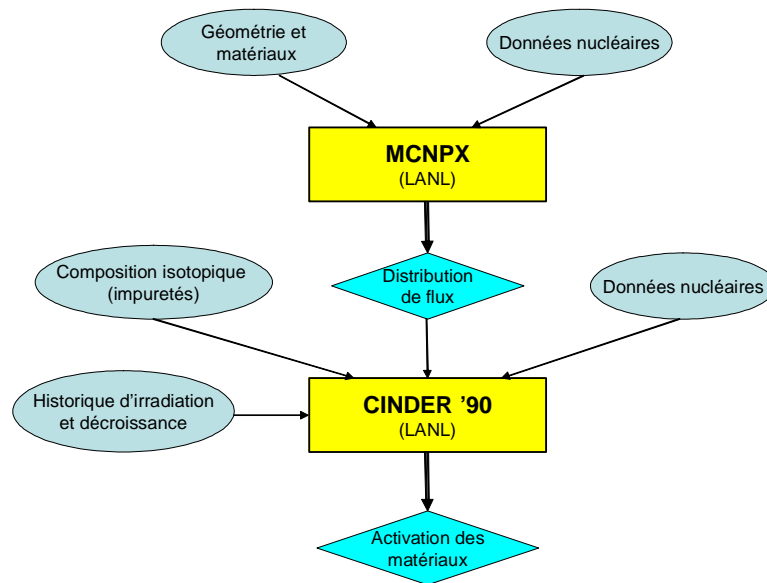


Fig. 1. Schéma des calculs de flux et d'activation.

L'activation des matériaux est calculée avec le code déterministe CINDER'90 [2] développé au laboratoire de Los Alamos (USA). Le code CINDER permet de modéliser quasiment toutes les réactions possibles induites par les neutrons et les gammas, en utilisant une librairie de données nucléaires très vaste. Un tel outil de calcul permet de modéliser toutes les réactions nucléaires et les chaînes de décroissance qui peuvent conduire à la création d'un radio-isotope, en assurant ainsi que la totalité des voies de formation ait été incluse dans le calcul.

Les données de base utilisées par CINDER (sections efficaces, rapports de branchements, distributions des produits de fission, constantes de décroissance, etc.) comprennent des valeurs issues d'évaluations (ENDF, JEF et JENDL) ainsi que de modèles théoriques. Le code de calcul utilise un découpage énergétique très fin pour le calcul des taux de réactions de façon à assurer des résultats fiables pour tout spectre neutronique. Les sections efficaces des neutrons sont ainsi découpées en 63 groupes énergétiques, allant jusqu'à une énergie maximale de 25 MeV. Les sections efficaces photoniques sont elles découpées en 25 groupes énergétiques.

Les sections efficaces photonucléaires proviennent de la bibliothèque d'évaluation de l'IAEA. Elles ont été complétées par des calculs théoriques faits au DSM/DAPNIA, CEA Saclay. Une description de la construction de la bibliothèque est donnée dans [3]. Les principaux mécanismes d'activation sont présentés au paragraphe 3.

Compte tenu de l'importance des données nucléaires dans les calculs d'activation, les sections efficaces utilisées dans CINDER ont été comparées à celles issues des trois bibliothèques principales pour les réactions plus significatives [4]. Cela a conduit à une réévaluation et une mise à jour des sections efficaces de capture radiative (n,γ) du ^{13}C et à la section efficace de la réaction (n,p) sur le ^{14}N . Quant aux autres sections efficaces étudiées, les valeurs de la bibliothèque CINDER sont cohérentes avec celles des trois bibliothèques majeures.

Les données essentielles lors du calcul d'activation sont la géométrie de l'environnement que l'on souhaite étudier, présentée au paragraphe 5, l'historique du fonctionnement de l'installation, présentée au paragraphe 6 et la composition chimique des matériaux présentée au paragraphe 7.

Une fois l'irradiation terminée, il est possible d'effectuer des simples calculs de décroissance afin d'obtenir l'activité massique à différents intervalles de temps appropriés après l'arrêt de l'accélérateur. L'activité massique a ainsi été calculée sur une période de 300 ans. Cela permet, d'une part, d'avoir la valeur de l'activité au début des travaux de démantèlement quelque soit la date choisie et, d'autre part de pouvoir déterminer rapidement, en cas de besoin, la période de temps nécessaire pour que l'activité massique descende en dessous d'un seuil limite souhaité. Le choix de calculer l'activité résiduelle après 300 ans l'arrêt du accélérateur (en 2300) répond à une demande de l'ANDRA pour l'acceptation des déchets TFA et FA dans leurs centres de stockage.

3. PRESENTATION DES MECANISMES D'ACTIVATION

Dans l'accélérateur LURE, un faisceau d'électrons de 1 GeV était propulsé sur une cible de tungstène afin de produire des positrons. Au niveau de la cible la totalité du faisceau est arrêtée, c'est à ce niveau que l'activation va être maximale.

L'activation induite dans les matériaux avoisinant la cible peut être d'origine photonique ou neutronique. L'activation par les photons résulte des réactions photonucléaires associant la capture d'un photon avec l'émission de neutrons ou de protons. Des réactions photonucléaires peuvent avoir lieu avec les noyaux lourds présents dans les bétons sous forme d'impuretés, mais elles ne participent que très peu à l'activation induite totale. Les éléments ainsi créés ont en général un temps de vie court.

L'activation neutronique provient essentiellement des captures radiatives, où l'absorption du neutron par le noyau est accompagnée par l'émission d'un photon. Ce phénomène est dominant pour les neutrons thermiques. De nombreuses autres réactions nucléaires peuvent générer des isotopes radioactifs : l'absorption peut être accompagnée de l'émission de deux ou plus neutrons ou de particules chargées (p, α, \dots). Ce sont généralement des réactions à seuil.

Afin d'estimer la contribution relative des photons et des neutrons à l'activation des matériaux de la structure du LURE, on a effectué un calcul préliminaire sur une portion en béton à côté du convertisseur. Au moment de l'arrêt du faisceau, l'activation induite par les neutrons est plus de 20 fois supérieure à celle due aux photons.

Après avoir présenté les différents mécanismes de production de photons et de neutrons dans le cas du LURE, nous présenterons les principales réactions d'activation.

3.1. Production de photons

Quand les électrons accélérés pénètrent dans la cible, ils interagissent avec la matière en produisant essentiellement des photons par rayonnement de freinage. Ces photons qui ont un spectre énergétique s'étalant de zéro jusqu'à l'énergie cinétique de l'électron incident, peuvent également interagir avec la matière par création de paire. A leur tour, les électrons et positrons produits seront à l'origine de nouveaux photons. En fonction du milieu traversé par un électron ou un photon et de sa densité, la particule incidente donne naissance à plusieurs générations d'électrons ou de photons. Les photons primaires et secondaires peuvent également induire des réactions photonucléaires, avec production d'autres particules. Les réactions photonucléaires sont responsables de l'activation photonique. De façon générale l'ensemble de ces interactions est désigné par le terme de cascade électromagnétique.

3.2. Production des neutrons

Si l'énergie des photons est supérieure à l'énergie de liaison des nucléons (entre 5 et 10 MeV en fonction du noyau), les interactions photonucléaires sont à l'origine d'émission de photoneutrons. Cette production de neutrons est due, en fonction de l'énergie des photons, à trois phénomènes majeurs qui sont détaillés dans les paragraphes suivants :

- les réactions du type résonance géante ;
- l'effet quasi-deutéron ;
- les réactions photo-pion.

Pour mieux illustrer ces différents phénomènes, les figures suivantes montrent, dans le cas d'une cible de cuivre :

- les sections efficaces macroscopiques de production de neutrons (Figure 2) ;
- le spectre de neutrons produits par un faisceau d'électrons de 500 MeV dans une cible de 5 cm d'épaisseur (Figure 3).

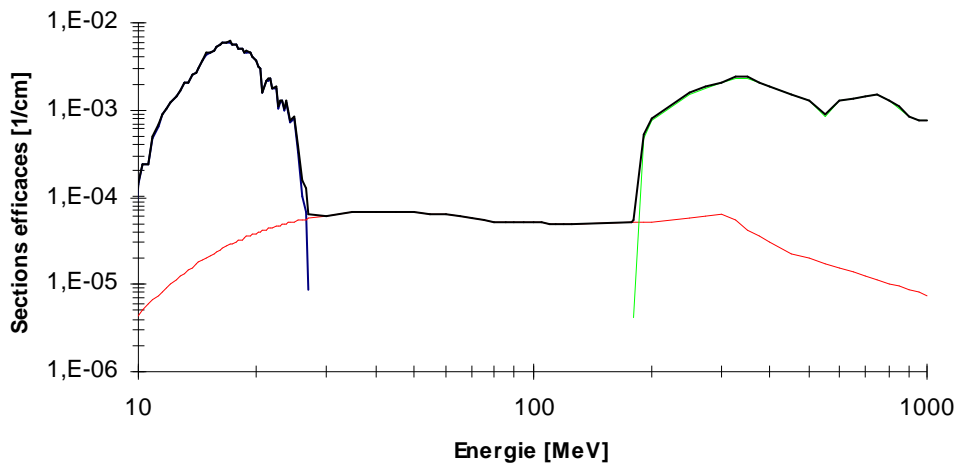


Fig. 2. Sections efficaces pour la production de neutrons sur le cuivre en fonction de l'énergie des photons. En noir - la section efficace totale; en bleu - la résonance géante; en rouge - le quasi-deutéron; en vert les réactions photo-pion.

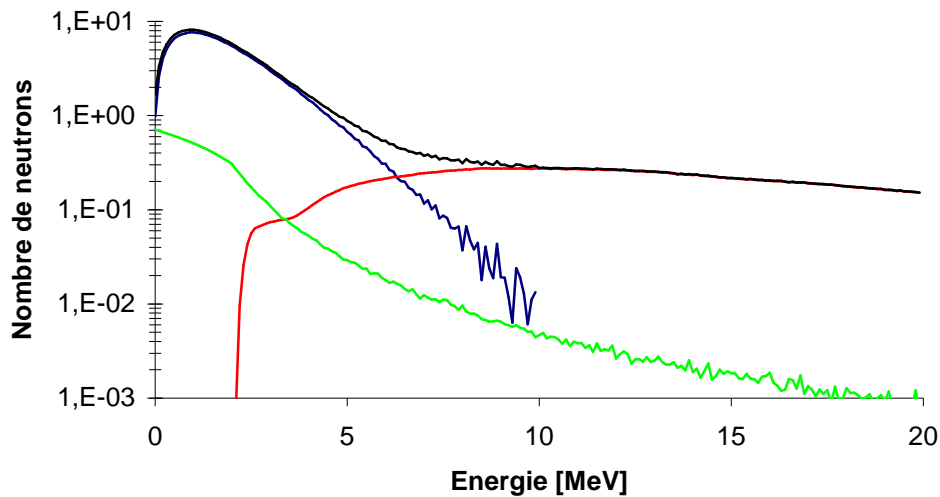


Fig. 3. Nombre de neutrons émis en fonction de leur énergie. En noir - la section efficace totale; en bleu - la résonance géante; en rouge - le quasi-deutéron; en vert - les réactions photo-pion.

3.2.1. Réaction de type résonance géante

Les réactions du type résonance géante dominent pour des énergies de photons entre l'énergie seuil et environ 30 MeV. La section efficace peut y atteindre des valeurs de plusieurs centaines de millibarns. Cet intervalle d'énergie correspond typiquement à l'énergie moyenne des photons produits par rayonnement de freinage, ce qui explique que les neutrons soient principalement produits par résonance géante. Au dessus de 30 MeV la section efficace de production diminue très rapidement.

L'absorption d'un photon par le noyau entraîne l'excitation du noyau, l'excédent d'énergie est alors émis sous la forme d'un nucléon. Dans le cas des noyaux lourds, la désexcitation mène à l'émission d'un seul neutron, bien que des réactions ($\gamma, 2n$) soient possibles pour des photons de plus haute énergie. L'émission de protons est, quant à elle, très limitée à cause de la barrière coulombienne. Pour les noyaux légers, seul un nucléon quitte le noyau et l'émission d'un proton à la place du neutron devient possible.

Le spectre en énergie des neutrons de résonance géante est décrit par le spectre de Maxwell donné par l'équation suivante :

$$\frac{dn}{dE_n} \propto \frac{E_n}{T^2} e^{-\frac{E_n}{T}}$$

Les neutrons sont essentiellement produits avec une énergie comprise entre 1 et 5 MeV (Figure 3). Lors de leur transport ces neutrons vont perdre leur énergie jusqu'à thermalisation et/ou absorption.

La plupart des neutrons de basse énergie sont produits par évaporation. Il n'y a donc pas de direction d'émission privilégiée et leur distribution angulaire est isotrope. Par contre les neutrons d'énergie plus élevée, produits par des réactions plus directes, ont une distribution angulaire fortement anisotropique ; la direction du photon incident est privilégiée.

3.2.2. Effet quasi-deutéron

L'effet quasi-deutéron est le mécanisme qui domine pour des énergies des photons comprises entre 50 et 150 MeV. La section efficace de production des neutrons croît et atteint son maximum entre 50 et 200 MeV puis diminue. Au-delà de 500 MeV le phénomène devient négligeable.

Le photon incident interagit avec une paire proton-neutron du noyau et provoque la photodésintégration du deutéron. Le proton et le neutron sont éjectés du noyau. La plupart des neutrons produits ont une énergie comprise entre 50 et 150 MeV (Figure 3) et leur distribution angulaire est modérément piquée vers l'avant.

3.2.3. Réaction photo-pion

Cet effet devient prépondérant pour des énergies supérieures à 150 MeV (masse du pion). Les photons incidents vont être à l'origine de la production de pions. Ces particules sont réabsorbées avant de sortir du noyau et cela déclenche une cascade intranucléaire menant à la production de neutrons de haute énergie, de protons ou d'autres pions. Par la suite l'énergie résiduelle sera à l'origine de phénomène d'évaporation, avec l'émission de neutrons (Figure 3), de protons et de photons.

Les particules issues de la cascade intranucléaire sont plutôt émises vers l'avant, tandis que celles issues du mécanisme d'évaporation ont une distribution angulaire isotrope.

3.3. Principales réactions d'activation

Les Tableaux 1 et 2 présentent la liste des principales réactions d'activation produisant des isotopes à période radioactive supérieure à 200 jours. Les isotopes ayant une période plus courte ne sont pas pénalisants lors du démantèlement. En effet entre l'arrêt de l'accélérateur et le début des travaux plusieurs années se seront écoulées et ces isotopes auront disparu.

Isotope	Réaction	Période radioactive
²² Na	²³ Na(γ , n) ²² Na	2,6019 a
³⁶ Cl	³⁷ Cl(γ , n) ³⁶ Cl	3,01 10 ⁵ a
⁵⁴ Mn	⁵⁵ Mn(γ , n) ⁵⁴ Mn	312,3 j
⁹² Nb	⁹³ Nb(γ , n) ⁹² Nb	3,47 10 ⁷ a
¹³³ Ba	¹³⁴ Ba(γ , n) ¹³³ Ba	10,52 a
⁵⁷ Co	⁵⁸ Ni(γ , n) ⁵⁷ Ni → ⁵⁷ Co	271,79 j
⁵⁷ Co	⁵⁸ Ni(γ , p) ⁵⁷ Co	271,79 j
⁶⁰ Co	⁶¹ Ni(γ , p) ⁶⁰ Co	5,2714 a

Tab. 1. Principales réactions d'activation induites par réactions photonucléaires.

Isotope	Réaction	Période radioactive
³ H	² H(n, γ) ³ H	12,33 a
¹⁴ C	¹³ C(n, γ) ¹⁴ C	5730 a
³⁶ Cl	³⁵ Cl(n, γ) ³⁶ Cl	3,01 10 ⁵ a
⁴⁰ K	³⁹ K(n, γ) ⁴⁰ K	1,277 10 ⁹ a
⁶⁰ Co	⁵⁹ Co(n, γ) ⁶⁰ Co	5,2714 a

^{63}Ni	$^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}$	100,1 a
^{65}Zn	$^{64}\text{Zn}(n, \gamma)^{65}\text{Zn}$	244,26 j
^{79}Se	$^{78}\text{Se}(n, \gamma)^{79}\text{Se}$	$6,5 \cdot 10^4$ a
^{93}Zr	$^{92}\text{Zr}(n, \gamma)^{93}\text{Zr}$	$1,53 \cdot 10^6$ a
^{108}Ag	$^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{108}\text{Ag}$	418 a
^{110}Ag	$^{109}\text{Ag}(n, \gamma)^{110}\text{Ag}$	249,79 j
^{133}Ba	$^{132}\text{Ba}(n, \gamma)^{133}\text{Ba}$	10,52 a
^{134}Cs	$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}$	2,0648 a
^{152}Eu	$^{151}\text{Eu}(n, \gamma)^{152}\text{Eu}$	13,542 a
^{154}Eu	$^{153}\text{Eu}(n, \gamma)^{154}\text{Eu}$	8,593 a
^{55}Fe	$^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$	2,73 a
^{41}Ca	$^{40}\text{Ca}(n, \gamma)^{41}\text{Ca}$	$1,03 \cdot 10^5$ a
^{22}Na	$^{22}\text{Na}(n, 2n)^{22}\text{Na}$	2,6019 a
^{54}Mn	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	312,3 j
^{54}Mn	$^{55}\text{Mn}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$	312,3 j
^{60}Co	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	5,2714 a
^{60}Co	$^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$	5,2714 a
^{134}Cs	$^{134}\text{Ba}(n, p)^{134}\text{Cs}$	2,0648 a
^{137}Cs	$^{137}\text{Ba}(n, p)^{137}\text{Cs}$	30,07 a
^{14}C	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	5730 a
^{14}C	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$	5730 a
^{92}Nb	$^{93}\text{Mo}(n, p)^{92}\text{Nb}$	$3,47 \cdot 10^7$ a
^{133}Ba	$^{134}\text{Ba}(n, 2n)^{133}\text{Ba}$	10,52 a
^{204}Ti	$^{204}\text{Pb}(n, p)^{204}\text{Ti}$	3,78 a

Tab. 2. Principales réactions d'activation induites par neutrons.

Comme on peut le voir la plupart des réactions d'activation sont induites par les neutrons. Le ^{22}Na , ^{54}Mn et ^{133}Ba sont produits par activation photonique et neutronique.

4. TEST DES CALCULS DE FLUX

Une série de calculs a été menée avec MCNPX afin d'en évaluer la fiabilité pour les phénomènes physiques caractéristiques du LURE. On a ainsi évalué le rendement neutronique de plusieurs cibles dont les natures sont représentatives des matériaux rencontrés dans la zone convertisseur pour différentes énergies des électrons incidents, de 18 MeV à 2.04 GeV. Les résultats ont été comparés à des données expérimentales quand elles étaient disponibles ou à d'autres calculs indépendants.

4.1. Electrons d'énergie inférieure à 35 MeV

On a d'abord évalué le flux de neutrons en sortie d'une cible bombardée par des électrons de basse énergie, allant de 18 à 34 MeV (région de résonance géante). De nombreux calculs paramétriques ont été faits, en variant le matériel constituant la cible (aluminium, cuivre, plomb), l'énergie des électrons incidents et l'épaisseur de la cible. Dans les Figures 4 à 7, le rendement neutronique (nombre de neutrons produits par électron incident) est comparé à des résultats expérimentaux [5].

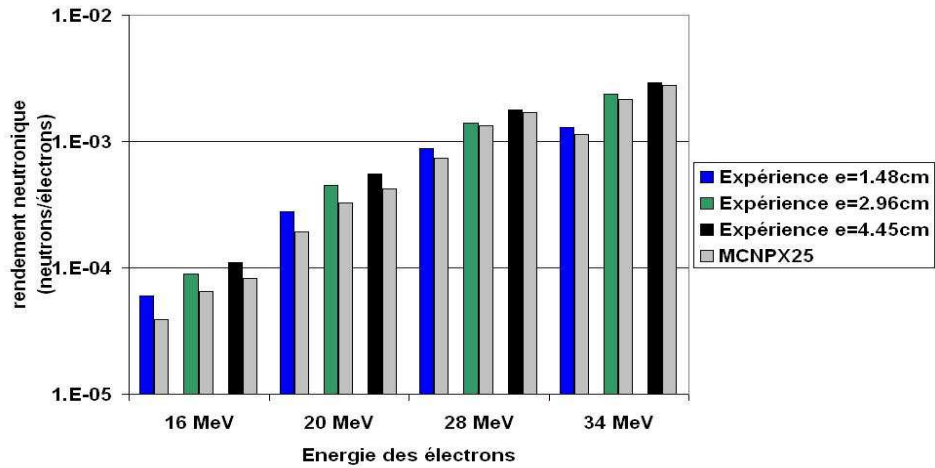


Fig. 4. Rendement neutronique dans une cible de cuivre en fonction de l'épaisseur et de l'énergie des électrons incidents. Comparaison calcul MCNPX / expérience.

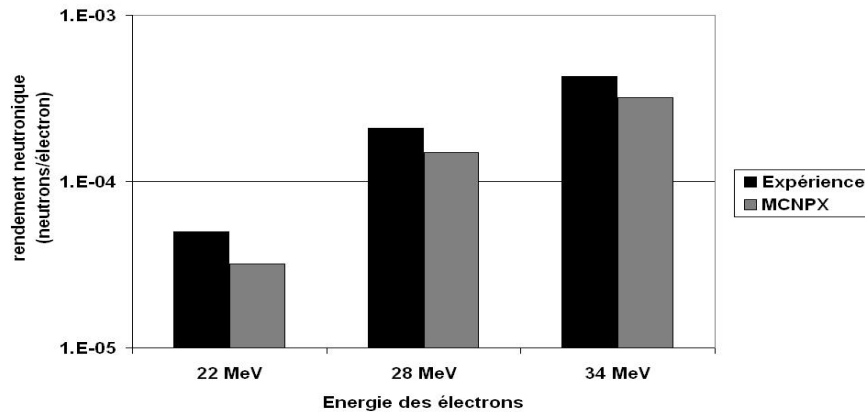


Fig. 5. Rendement neutronique dans une cible en Aluminium de 8.96 cm d'épaisseur en fonction de l'énergie des électrons incidents. Comparaison calcul MCNPX / expérience.

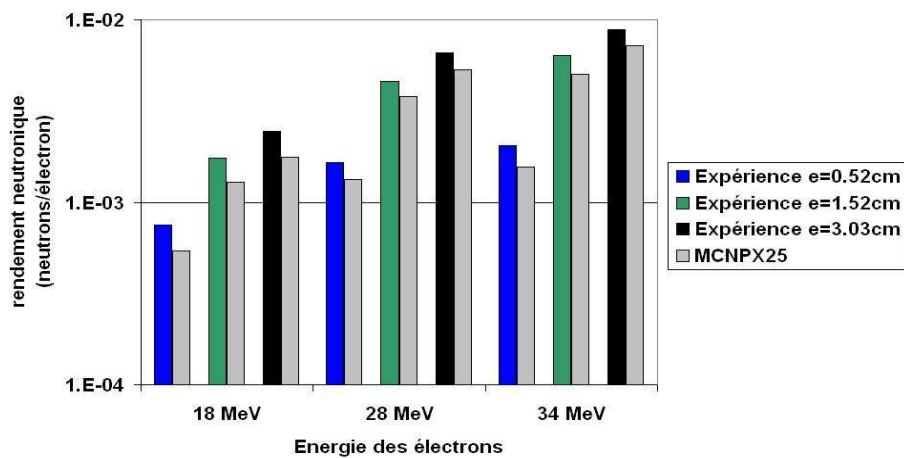


Fig. 6. Rendement neutronique dans une cible de plomb en fonction de l'épaisseur et de l'énergie des électrons incidents. Comparaison calcul MCNPX / expérience.

Comme on pouvait s’y attendre, le rendement neutronique augmente avec l’énergie de l’électron incident et, à énergie constante, avec l’épaisseur de la cible. Pour des électrons de faible énergie, les prédictions de MCNPX sont proches des valeurs mesurées. Pour la cible en cuivre, le rapport entre calcul et expérience est de l’ordre de 0.7 pour les électrons de 16 MeV et avoisine 0.9 à 34 MeV. Avec les cibles en aluminium et en plomb, on constate également une sous-estimation des valeurs expérimentales de l’ordre de 20 à 30%.

Ces résultats sont satisfaisants compte tenu de la précision requise pour les calculs d’activation.

4.2. Electrons de 1 GeV

Cette deuxième série de calculs nous place dans des conditions proches du fonctionnement de l’accélérateur LURE : les électrons incidents ont une énergie de 1 GeV et une des cibles testée (en plomb) a des caractéristiques proches de celle du LURE (en tungstène).

L’histogramme et le tableau suivants (Figure 7) présentent et comparent le nombre de neutrons produits avec des énergies supérieures ou inférieures à 20 MeV par un électron incident de 1 GeV sur des cibles d’aluminium, de cuivre et de plomb. Les calculs MCNPX sont comparés à ceux de FLUKA [6], code de calcul de référence pour les hautes énergies.

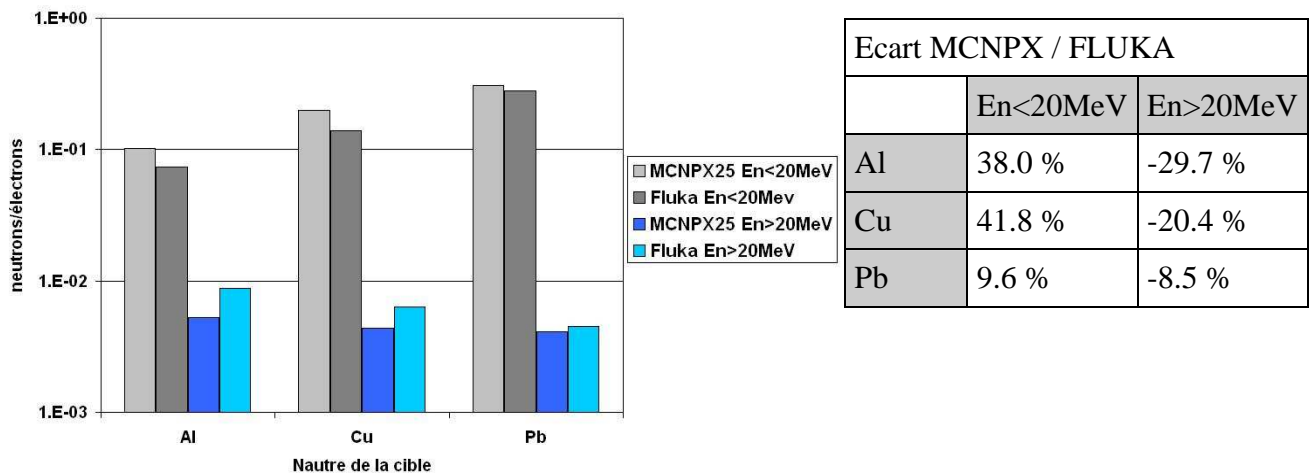


Fig. 7. Nombre de neutrons obtenus par calcul MCNPX comparé aux estimations FLUKA pour un faisceau d’électrons incidents de 1 GeV sur des cibles d’aluminium, de cuivre et plomb.

Dans les trois simulations, MCNPX surestime les neutrons de basse énergie et sous-estime ceux de haute énergie par rapport aux calculs FLUKA. Pour les cibles en aluminium et de cuivre la surestimation est de l’ordre de 40% tandis que l’écart entre les deux codes devient très faible dans le cas de la cible en plomb, inférieur à 10%.

Du point de vue des études d’activation, ces résultats sont satisfaisants, en effet comme nous l’avons vu dans le paragraphe 3 ce sont les neutrons de basse énergie, essentiellement les neutrons thermiques, qui jouent le rôle le plus important dans l’activation des matériaux.

4.3. Conclusion

Cette série de calculs nous a permis :

- de mieux comprendre les phénomènes physiques qui ont lieu dans et autour de la cible ;
- d’avoir des informations sur les régions de l’accélérateur susceptibles d’être les plus activées.

De manière générale, on remarque que pour des électrons à basse énergie on a un rapport entre 0.7 et 0.8 entre les calculs et les mesures. Tandis que pour des électrons de haute énergie on obtient une bonne cohérence des valeurs calculées par MCNPX et FLUKA. Dans le cas des cibles lourdes (Pb et W), une surestimation, de l'ordre d'un facteur 2, des neutrons de haute énergie par rapport aux résultats expérimentaux (voir Annexe 1).

Les écarts constatés entre les différents codes de transport et les mesures expérimentales sont faibles par rapport à la précision requise pour le calcul d'activation.

5. GEOMETRIE UTILISEE

La description de la géométrie de la zone du convertisseur et de la section 8 est basée sur les plans des bâtiments. Une visite a permis de résoudre les incohérences entre les différents plans mis à notre disposition.

Lors de la construction du modèle il a fallu également tenir compte des modifications réalisées sur l'accélérateur en 1991 :

- le changement de la cible ;
- l'adjonction de deux nouvelles protections biologiques en plomb, situées à l'avant et perpendiculairement à la cible.

Le schéma utilisé dans MCNPX pour le convertisseur est présenté dans le Figure 8. Les autres géométries utilisées sont présentées dans l'Annexe 2.

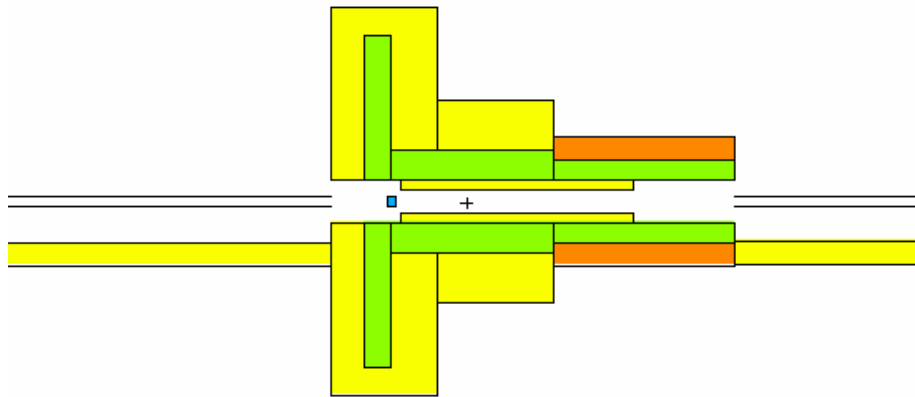


Fig. 8. Schéma du convertisseur utilisé dans MCNPX.

La géométrie utilisée dans MCNPX contient une description précise :

- de l'intégralité des murs en béton entourant la ligne de faisceau ;
- du sable entourant le souterrain, et celui comblant les murs de l'accélérateur ;
- des principaux équipements de transport des électrons et des positrons ;
- de la cible et du matériel de focalisation qui l'entoure.

6. HISTORIQUE DU FONCTIONNEMENT DE L'ACCELE- RATEUR

L'historique de fonctionnement de l'accélérateur a été reconstitué à partir des comptes rendus des expériences qui ont eu lieu sur le site. Le nombre d'heures de fonctionnement de l'accélérateur par an est présenté dans le Tableau 3. Cet historique a permis de caractériser les périodes d'irradiation et de décroissance pour l'utilisation de CINDER'90.

Année	Temps de tir sur le convertisseur (essais+tirs)	Temps total de faisceau dans le LINAC	NIL	Injection 1
1974		570		570
1975		760		760
1976		865		865
1977		770		770
1978		860		860
1979		3295		3295
1980		2560		2560
1981	1065	1573		1573
1982	778	2045		2045
1983	407	603		603
1984	564	813		813
1985	269	311		311
1986	310	478		478
1987	551	669		669
1988	731	761		761
1989	1025	1025		1025
1990	968	968		968
1991	925	925		925
1992	714	714		714
1993	935	935		935
1994	799	799		799
1995	758	758		758
1996	772	772	542	230
1997	693	693	285	408
1998	788	824	542	282
1999	1268	1287	856	431
2000	1082	1082	691	391
2001	842	842	561	281
2002	862	862		862
2003	600	600	400	200
total	17706	30019	3877	26142

Tab. 3. Temps de tirs dans l'accélérateur en heures par an en fonction de l'injecteur utilisé.

La plupart des expériences conduites au LURE étaient réalisées avec des électrons de 1 GeV, mais des tirs de réglages ont été réalisés à une énergie inférieure. Lors des modélisations on a assumé que :

- l'intégralité des tirs était à pleine puissance de l'accélérateur (faisceau d'électrons incidents de 1 GeV) ;
- l'intégralité du faisceau d'électrons arrive sur le convertisseur.

Cette approche est la plus pénalisante et entraînera une surestimation des activités induites lors des calculs. Le temps d'irradiation est réparti de façon continue tout au long de l'année.

Une modification importante a été opérée dans l'accélérateur en 1991, avec le changement de la cible en tungstène : l'ancienne cible de 1.1 cm d'épaisseur pour 0.8 cm de rayon a été remplacée par une cible plus épaisse (2 cm d'épaisseur pour 2.5 cm de rayon). A ce moment on a également ajouté des protections biologiques en plomb. Le changement de cible entraîne des différences importantes au niveau des flux de particules dans l'environnement.

Lors des modélisations on a ainsi réalisé deux calculs distincts pour représenter le fonctionnement de l'accélérateur de 1974 à 1991 (cible mince) et de 1992 à 2003 (cible épaisse et protections en plomb).

Au cours de ces périodes deux injecteurs ont été utilisés l'Injection 1, opérationnel depuis 1974, et le canon NIL depuis 1996. Le nombre d'électrons arrêtés (en électrons par heure) sur les cibles peut être estimé à l'aide de la formule suivante :

$$Nb = \text{largeur d'impulsion} \cdot \text{fréquence} \cdot \text{intensité crête du faisceau} \cdot 3600 \text{ s} / \text{charge de l'électron}$$

Les résultats de ce calcul sont présentés dans le Tableau 4.

	NIL	INJ 1
Fréquence	25 Hz	
Largeur d'impulsion	5 ns	30 ns
Intensité crête du faisceau	2.05 A	1 A
Nb	$5.77 \cdot 10^{15}$	$1.62 \cdot 10^{16}$

Tab. 4. Caractéristiques des injecteurs NIL et Injection 1 et nombre d'électron arrêtés correspondants

Dans la section 8 des pertes ont été détectées. On a considéré que les pertes étaient localisées sur l'IRIS. Les valeurs utilisées pour la simulation de ces pertes sont présentées dans le Tableau 5.

Energie (MeV)	Tir convertisseur		Tir direct		Simulation
	387	392	243	247	
Perte d'électrons en e ⁻ /h	$4.94 \cdot 10^{13}$	$1.44 \cdot 10^{14}$	$7.5 \cdot 10^{12}$	$4.4 \cdot 10^{13}$	moyenne

Tab. 5. Energie et pertes faisceau au niveau de l'IRIS.

7. COMPOSITION DES MATERIAUX

La connaissance de la composition chimique des matériaux présents sur l'accélérateur est très importante lors d'une étude d'activation. En effet les impuretés des matériaux peuvent contribuer en grande partie à leur activation. C'est pour cela que le CNRS a effectué des prélèvements et des analyses afin de déterminer la composition chimique des différents matériaux présents sur LURE. Il convient cependant de différencier les besoins des deux codes de calculs.

Lors des calculs MCNPX, les éléments présents dans les matériaux comme impuretés influenceront très peu le transport des particules et n'apparaissent donc pas dans les calculs. Pour CINDER, la composition isotopique doit donc être aussi précise que possible, car les impuretés vont jouer un rôle important dans la détermination de l'activation.

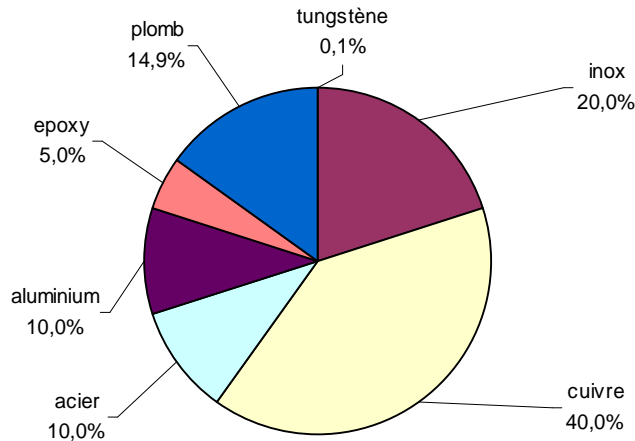


Fig. 9. Composition du convertisseur.

La composition du convertisseur est donnée dans la Figure 9. La composition des différents métaux composant le convertisseur ainsi que la composition des autres matériaux sont données dans les tableaux de l'Annexe 3.

8. Validation des calculs par comparaison avec le carottage

8.1. Au niveau du convertisseur

Trois carottages de béton d'environ 25 cm de longueur et 5 cm de diamètre ont été effectués dans les bétons de la zone convertisseur et apparaissent en vert sur la Figure 11. La carotte 1 est parallèle au faisceau d'électrons et est située à une vingtaine de centimètres de la surface du mur. Elle apporte des informations sur la distribution angulaire des neutrons et des photons autour de la cible. Les carottes 2 et 3 ont été prélevées perpendiculairement au mur et donc permettent d'évaluer les variations d'activation dans la profondeur du béton. Ces carottes ne comprennent aucun morceau de fer à béton et ainsi sont représentatives de la composante du béton armé.

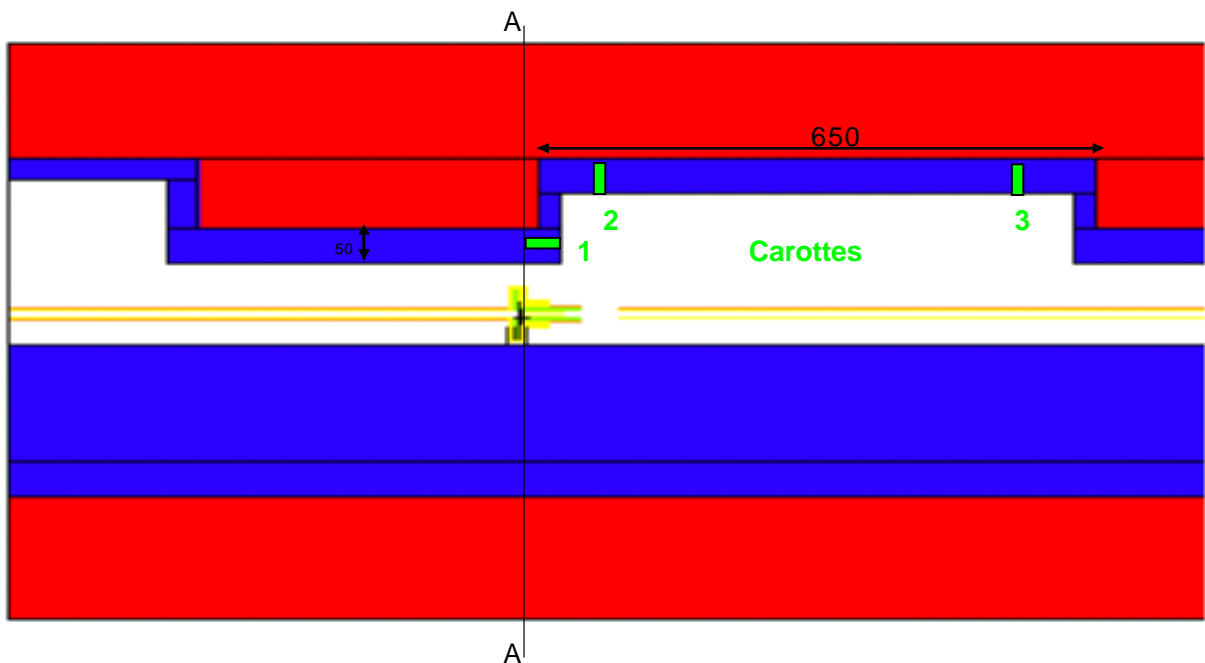


Fig. 10. Position des carottes prélevées dans la zone du convertisseur (vue de dessus).

Elles ont été prélevées à différentes hauteurs, et en se référant au sol de l'accélérateur :

- la carotte 1 : à 80 cm de hauteur
- la carotte 2 : à 18.5 cm
- la carotte 3 : à 102 cm

Chaque carotte a été découpée en plusieurs tranches d'environ 5 cm de longueur (T1, T2, T3, T4, T5 et T6) et été analysée par le CNRS. On rappelle que T1 indique la tranche la plus proche de la surface et T6 la tranche la plus en profondeur.

Les résultats des mesures en laboratoire sont reportés dans le Tableau 6 et comparés aux résultats des nos modélisations.

Carotte 1 : activité fin 2002 (Bq/g)							
Tranche		T1	T2	T3	T4	T5	T6
⁶⁰ Co	calcul	5.6E-01	6.5E-01	7.1E-01	7.3E-01	7.4E-01	7.4E-01
	mesure	1.3E-01	2.0E-01	2.3E-01	3.0E-01	2.7E-01	2.5E-01
	calcul/mesure	4.3	3.3	3.1	2.4	2.7	3.0
¹³⁴ Cs	calcul	1.7E-01	1.9E-01	1.9E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01
	mesure	2.6E-02	4.2E-02	4.0E-02	3.8E-02	4.6E-02	3.7E-02
	calcul/mesure	6.5	4.5	4.8	5.3	4.4	5.4
¹⁵² Eu	calcul	1.8E+00	2.1E+00	2.3E+00	2.4E+00	2.4E+00	2.4E+00
	mesure	4.1E-01	6.3E-01	7.8E-01	8.7E-01	9.8E-01	6.7E-01
	calcul/mesure	4.4	3.3	3.0	2.8	2.5	3.6
¹⁵⁴ Eu	calcul	1.5E-01	1.7E-01	1.8E-01	1.8E-01	1.8E-01	1.8E-01
	mesure	4.3E-02	4.8E-02	5.2E-02	5.8E-02	7.1E-02	5.0E-02
	calcul/mesure	3.5	3.5	3.5	3.1	2.5	3.6

Carotte 2 : activité fin 2002 (Bq/g)							
Tranche		T1	T2	T3	T4	T5	T6
⁶⁰ Co	calcul	4.7E-01	4.5E-01	3.9E-01	3.2E-01	2.5E-01	1.9E-01
	mesure	1.4E-01	1.8E-01	1.2E-01	1.2E-01	7.1E-02	4.3E-02
	calcul/mesure	3.4	2.5	3.2	2.7	3.5	4.5
¹³⁴ Cs	calcul	1.5E-01	1.3E-01	1.1E-01	8.0E-02	5.8E-02	4.3E-02
	mesure	3.6E-02	3.3E-02	2.6E-02	2.7E-02	1.1E-02	<7.7E-03
	calcul/mesure	4.2	3.9	4.2	3.0	5.3	
¹⁵² Eu	calcul	1.5E+00	1.5E+00	1.3E+00	1.1E+00	8.4E-01	6.7E-01
	mesure	5.9E-01	7.5E-01	6.1E-01	5.3E-01	3.3E-01	2.4E-01
	calcul/mesure	2.5	2.0	2.1	2.1	2.6	2.8
¹⁵⁴ Eu	calcul	1.2E-01	1.2E-01	1.0E-01	8.0E-02	6.0E-02	4.7E-02
	mesure	5.3E-02	5.8E-02	4.0E-02	3.8E-02	2.5E-02	1.8E-02
	calcul/mesure	2.3	2.1	2.5	2.1	2.4	2.6

Carotte 3 : activité fin 2002 (Bq/g)							
Tranche		T1	T2	T3	T4	T5	T6
⁶⁰ Co	calcul	1.5E-01	1.3E-01	1.1E-01	9.2E-02	7.0E-02	5.1E-02
	mesure	4.0E-02	3.5E-02	2.7E-02	2.0E-02	7.4E-03	<4.6E-03
	calcul/mesure	3.7	3.6	4.1	4.6	9.5	

¹³⁴ Cs	calcul	3.8E-02	3.1E-02	2.6E-02	2.1E-02	1.5E-02	1.0E-02
	mesure	1.1E-02	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03
	calcul/mesure	3.5					
¹⁵² Eu	calcul	5.1E-01	4.4E-01	4.4E-01	3.3E-01	2.6E-01	1.9E-01
	mesure	2.2E-01	1.8E-01	1.1E-01	8.4E-02	4.7E-02	3.5E-02
	calcul/mesure	2.3	2.4	4.0	3.9	5.5	5.4
¹⁵⁴ Eu	calcul	3.9E-02	3.3E-02	2.9E-02	2.4E-02	1.8E-02	1.3E-02
	mesure	2.0E-02	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03
	Calcul/mesure	2.0					

Tab. 6. Comparaison des résultats obtenus pour les différentes carottes de la zone du convertisseur par les calculs et par les analyses radiochimiques.

Nota : les valeurs présentées comme mesures sont les estimations réalisées par le CNRS à partir de mesures réelles effectuées à mi-2004 et normalisées à fin 2002.

On constate que l'on surestime les activités massiques mesurées expérimentalement d'un facteur 2 à 5 dans la plupart des tranches. Ce résultat est logique vu que l'on a choisi d'adopter l'attitude la plus pénalisante lors du calcul d'activation.

Concernant la position du maximum d'activité massique, les résultats sont en accord avec les mesures. Dans la carotte 2 l'activité massique est maximale dans les premiers centimètres de bétons tandis que les mesures montrent des maximums un peu plus en profondeur. Ceci peut s'expliquer par la méthode de calcul ; en effet les spectres et les flux des neutrons et des photons sont moyennés par tranches. En augmentant le nombre de division de la carotte, par exemple de centimètre en centimètre, le profil dans les premiers centimètres aurait pu être ascendant puis descendant.

En conclusion de cette étude on peut dire que malgré les écarts entre les simulations et les mesures, les résultats obtenus sont satisfaisants pour effectuer une étude de zonage déchets.

8.2. Dans la section 8

		Activité (Bq/g)				
Tranche		T1	T2	T3	T4	T5
⁶⁰ Co	calcul	3.4E-03	3.7E-03	3.6E-03	3.4E-03	3.0E-03
	mesure	8.6E-03	7.6E-03	7.7E-03	6.7E-03	<4.6E-03
	calcul/mesure	0.4	0.5	0.5	0.5	
¹³⁴ Cs	calcul	5.0E-04	5.0E-04	5.0E-04	4.0E-04	4.0E-04
	mesure	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03	<7.7E-03
	calcul/mesure					
¹⁵² Eu	calcul	9.0E-03	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-03	9.0E-03
	mesure	2.0E-02	2.0E-02	2.2E-02	1.9E-02	1.1E-02
	calcul/mesure	0.5	0.5	0.45	0.47	0.82
¹⁵⁴ Eu	calcul	8.0E-04	8.0E-04	8.0E-04	7.0E-04	6.0E-04
	mesure	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03	<5.5E-03
	calcul/mesure					

Tab. 7. Comparaison des résultats obtenus pour les différentes carottes de la section 8 par les calculs et par les analyses radiochimiques.

Dans la section 8 un seul carottage a été effectué. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7. Elle a été divisée en cinq tranches. La courbe d'activation en fonction de la profondeur est bien

reproduite. Par contre les calculs sous-estiment les valeurs mesurées (d'un facteur 2 à 3). Du fait que les activités massiques sont très faibles ceci n'est pas gênant dans le cadre de l'étude déchets.

9. Résultats des calculs d'activation (zonage déchets) pour la zone convertisseur et la section 8

9.1. Zone du convertisseur

L'activité totale de la zone est donnée dans le Figure 11, la répartition de l'activité entre le béton et l'acier est donnée dans les Figures 12 et 13. D'autres vues en coupe de l'activation sont données dans l'Annexe 4.

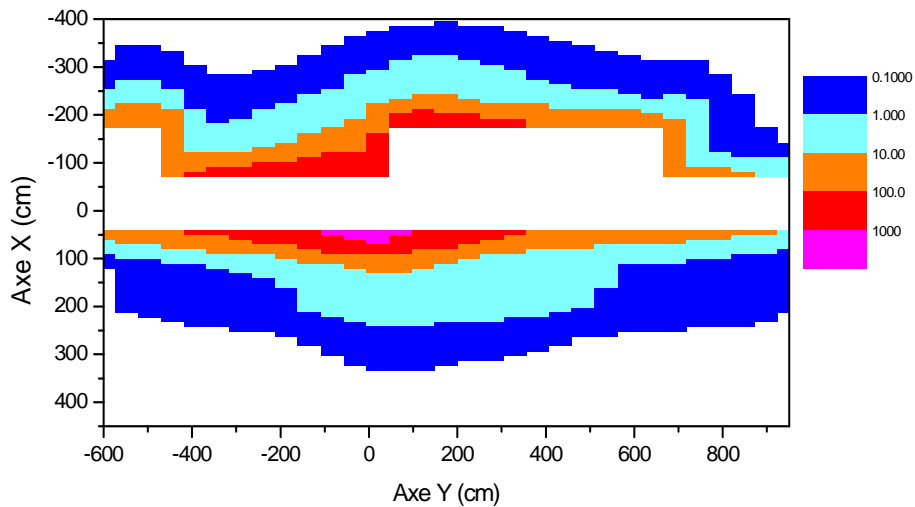


Fig. 11. Activation totale de la zone du convertisseur en (Bq/g).

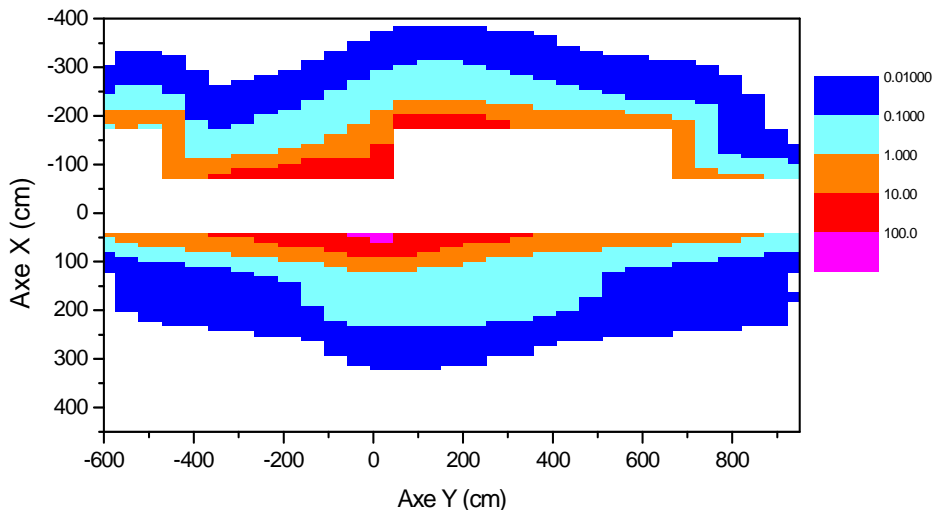


Fig. 12. Activation de l'acier dans la zone du convertisseur en (Bq/g).

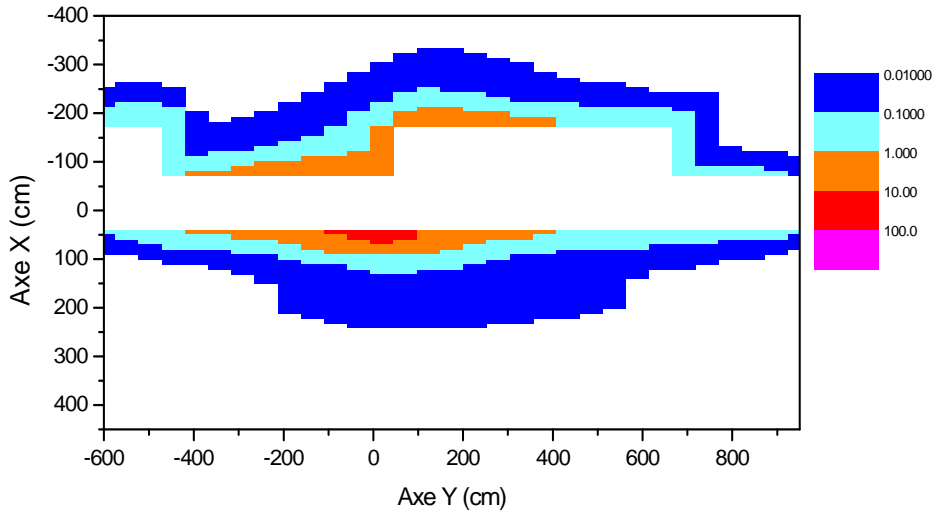


Fig. 13. Activation du béton dans la zone du convertisseur en (Bq/g).

L'évolution de l'activité des déchets au cours du temps est donnée dans les Figures 14 et 15. Pour les bétons la principale source de radioactivité est le tritium, après 100 ans seul le ^{41}Ca contribue. Pour l'acier le ^{55}Fe et le ^{60}Co sont les principales sources, après 100 ans il s'agit du ^{63}Ni .

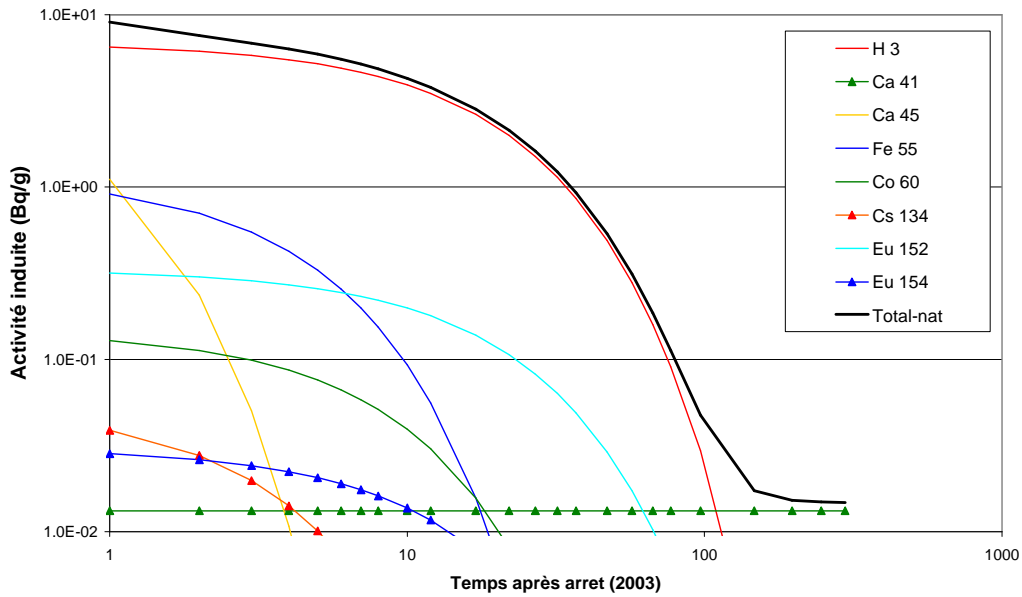


Fig. 14. Evolution de l'activation des bétons de la zone du convertisseur.

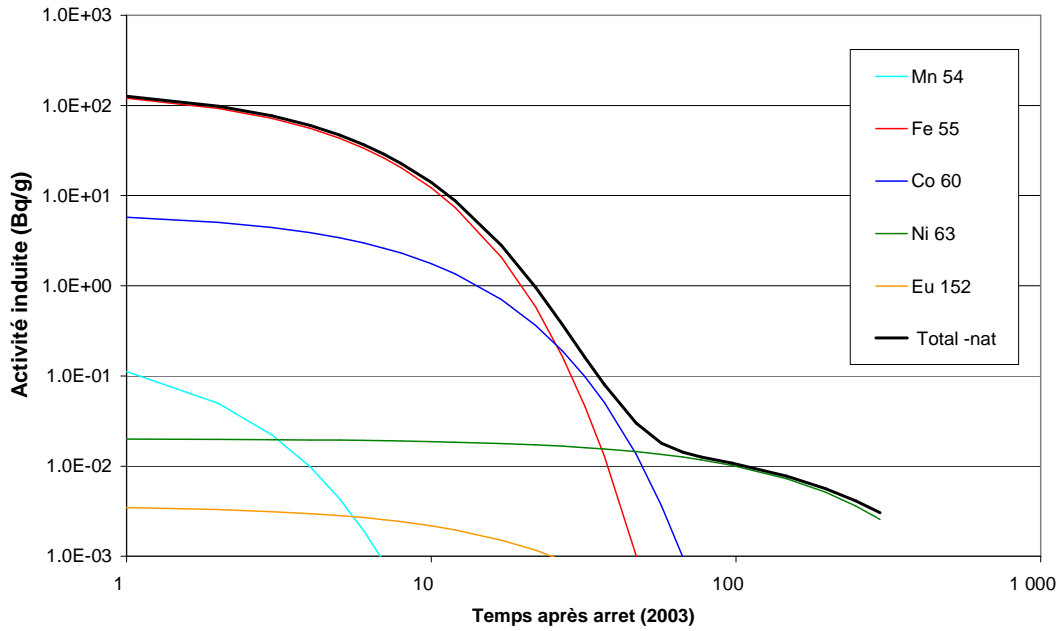


Fig. 15. Evolution de l'activation de l'acier de la zone du convertisseur.

En conclusion pour la zone du convertisseur, l'activation est importante mais les déchets sont de type TFA. Il est par contre important de noter que l'activation de l'acier est environ 10 fois supérieure à celle du béton pour la suite de l'étude de zonage déchets.

9.2. Section 8

L'activité totale de la zone est donnée dans la Figure 16, l'activité de l'acier est donnée dans la Figure 17. D'autres vues en coupe de l'activation sont données dans l'Annexe 5.

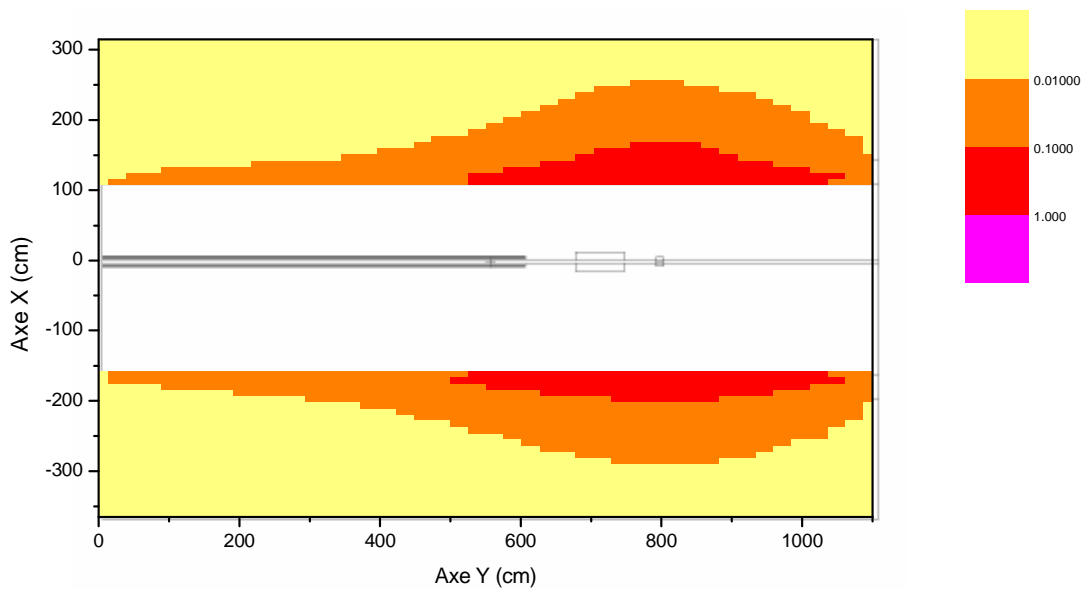


Fig. 16. Activation totale de la section 8 en (Bq/g).

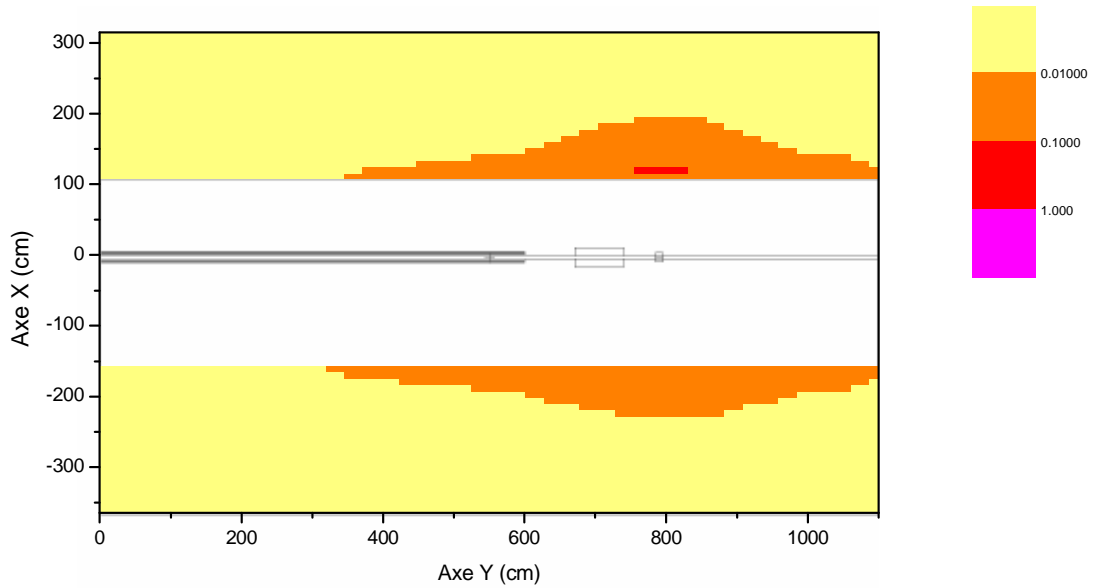


Fig. 17. Activation de l'acier de la section 8 en (Bq/g).

L'évolution de l'activité des déchets au cours du temps est donnée Figures 18 et 19. On retrouve les mêmes contributeurs que pour la zone convertisseur. Ceci est logique puisque les bétons et l'acier ont la même composition que dans la zone convertisseur. Pour les bétons, la principale source de radioactivité est le tritium, après 100 ans seul le ^{41}Ca contribue. Pour l'acier, le ^{55}Fe et le ^{60}Co sont les principales sources, après 100 ans il s'agit du ^{63}Ni .

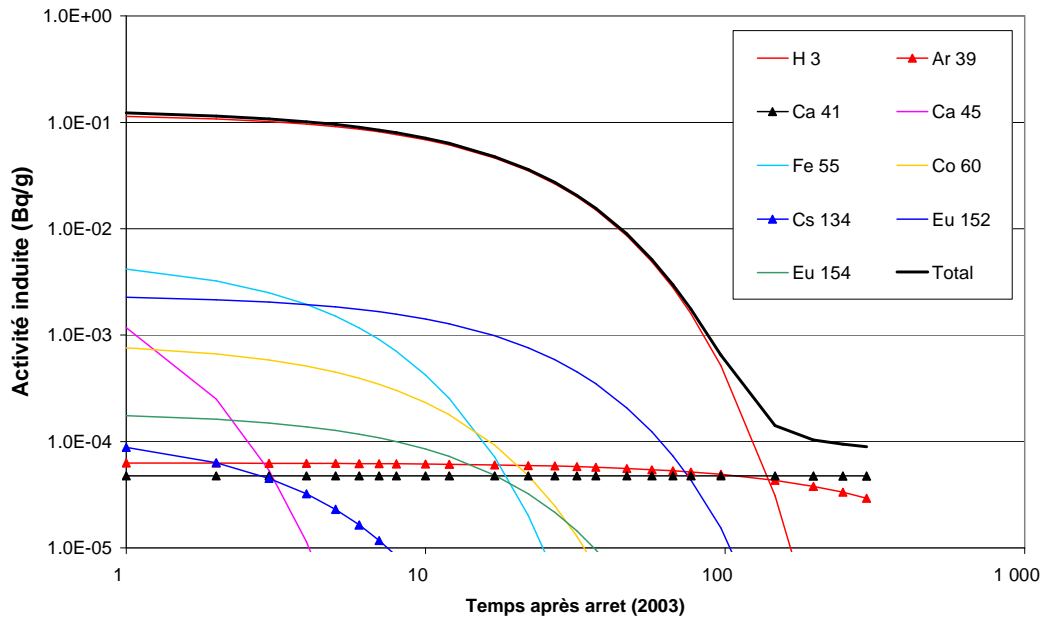


Fig. 18. Evolution de l'activation des bétons de la section 8.

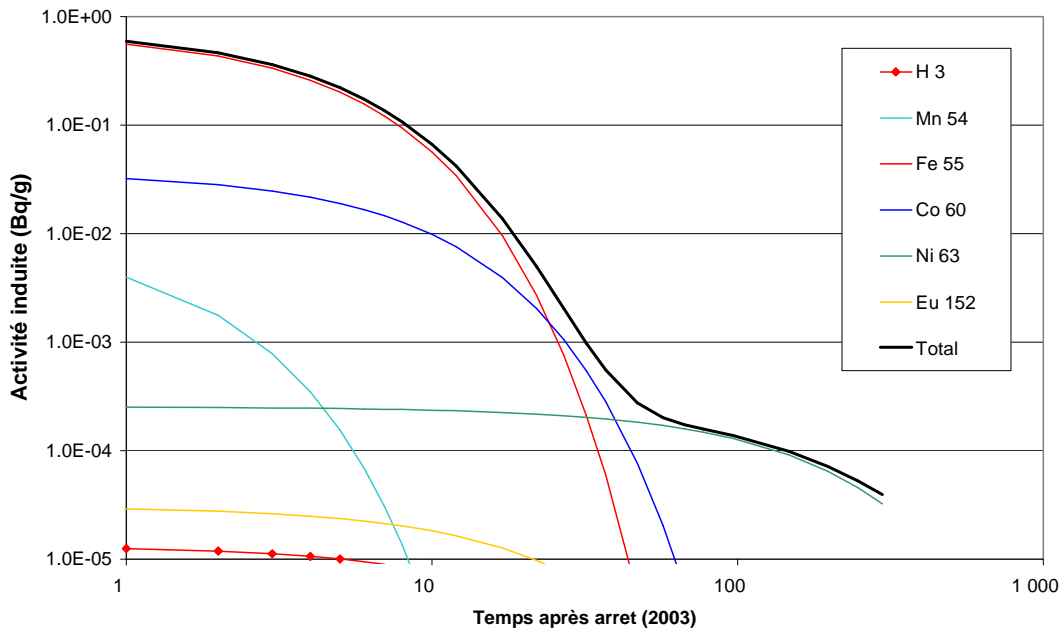


Fig. 19. Evolution de l'activation de l'acier de la section 8.

Compte tenu des très faibles taux observés, la section 8 peut être considérée comme zone à déchets conventionnels.

10. Conclusion

La méthode de calcul de l'activation a été testée tout d'abord en comparant les résultats des calculs de flux avec des données expérimentales ou des calculs effectués indépendamment avec d'autres codes de calcul. Ensuite les résultats du calcul d'activation ont été comparés avec des mesures effectuées sur des carottes de béton prélevées sur le site lui-même. Ces différents tests ont montré que les calculs surestimaient l'activation d'environ un facteur deux pour les zones les plus irradiées. On peut en déduire que ces calculs sont suffisants pour une étude de zonage déchets.

Les calculs d'activation ont montré que les déchets étaient des déchets conventionnels sauf pour une petite zone située à proximité du convertisseur. Les principaux contributeurs de la radioactivité à long terme sont le ^{41}Ca et le ^{63}Ni .

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] L. M. Waters, "MCNPX User's Manual Version 2.4.0", Los Alamos National Laboratory, report LA-CP-02-408 (2002),
- [2] W. B. Wilson, T. R. England, K. A. Van Riper, "Status of CINDER '90 Codes and Data", Los Alamos National Laboratory, preprint LA-UR-99-361 (1999).
- [3] M.-L. Giacri-Mauborgne, M. B. Chadwick, J.-C. David, D. Doré, D. Ridikas, W. B. Wilson, "Status of the photonuclear activation data library for CINDER'90", Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, September 27 - October 1, 2004, Santa Fe NM, USA.
- [4] M. Cometto, D. Ancius, D. Ridikas, "Testing of Different Data Libraries in Activation Analysis of Concrete and Graphite from Nuclear Installations", International Workshop on Nuclear Data for the Transmutation of Nuclear Waste, GSI-Darmstadt (Germany), 1-5 September 2003.
- [5] P. Vertes, D. Ridikas, "Some Test Calculations with IAEA Photonuclear Data Library", Journal of Nuclear Science and Technology, supplement 2, p. 1049-1052 (August 2002).
- [6] H. Dinter, A. Leuschner, K. Tesh, D. Dworak, J. Loskiewicz, "Calculation of hadron yields around thick targets and doses behind concrete shielding of high-energy electron accelerators", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 455 (2000) p.460-469.
- [7] H.-S. Lee, S. Ban, K. Shin, T. Sato, S. Maetaki, C. Chung, H D Choi, "Systematics of Differential Photoneutron Yields Produced from Al, Ti, Cu, Sn, W and Pb Targets by Irradiation of 2.04 GeV Electrons", Journal of Nuclear Science and Technology, supplement 2, p. 1228-1231 (August 2002).

ANNEXE 1

Etude du rendement neutronique pour des électrons de 2.04 GeV

Une série de calculs MCNPX présente le rendement neutronique produit dans différentes gammes d'énergie par des électrons incidents de 2.04 GeV sur :

- une cible d'étain en fonction de son épaisseur (mesurée en longueur de radiation) ;
- des cibles d'aluminium, de cuivre, d'étain, de tungstène, et de plomb pour une épaisseur correspondant à leur longueur de radiation respective.

Dans les figures suivantes, les résultats des calculs, à gauche, sont comparés à des mesures expérimentales [7], à droite.

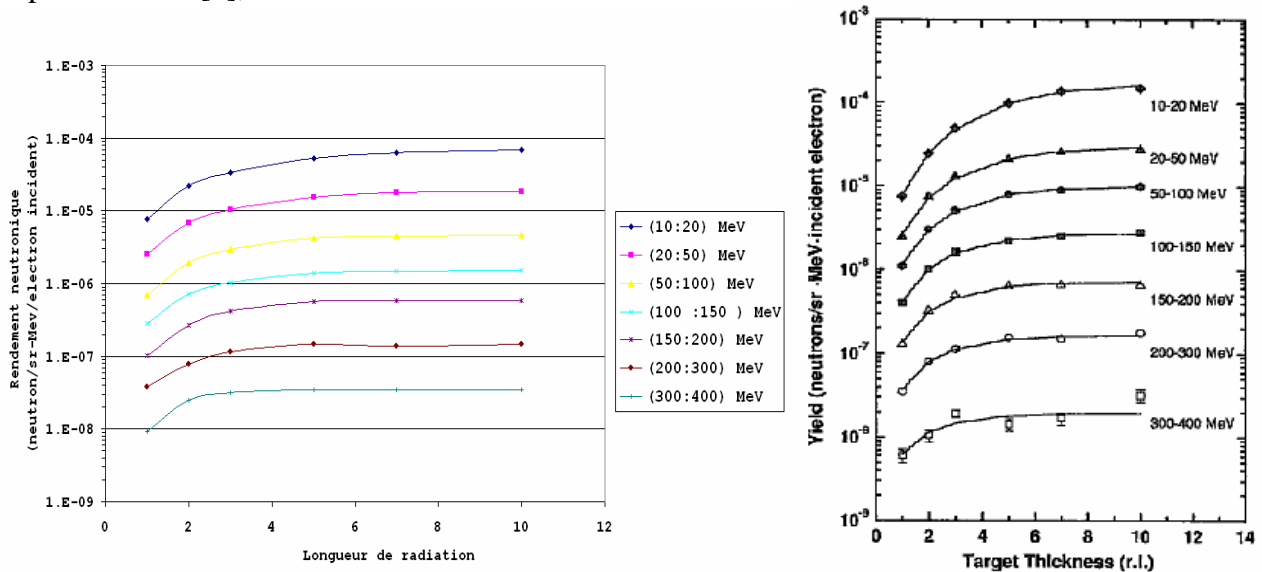


Fig. 20. Rendement neutronique par des électrons de 2.04 GeV dans une cible en étain en fonction de son épaisseur.

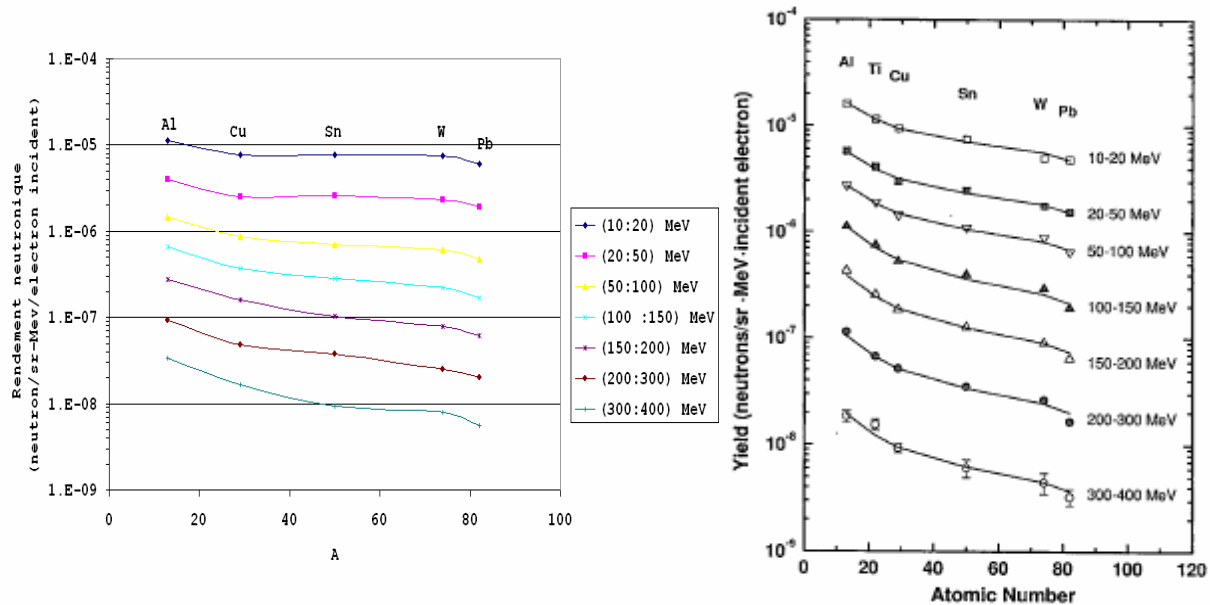


Fig. 21. Rendement neutronique par des électrons incidents de 2.04 GeV dans différentes gammes d'énergie pour des cibles d'aluminium ($e=8.9\text{cm}$), de cuivre ($e=1.4\text{cm}$), d'étain ($e=1.21\text{cm}$), de tungstène ($e=0.35\text{cm}$) et de plomb ($e=0.5\text{cm}$).

Pour l'étain (Figure 20), les valeurs mesurées et calculées sont proches, surtout aux faibles épaisseurs. Des écarts significatifs apparaissent lorsque l'on augmente l'épaisseur de la cible ; les calculs sous-estiment les résultats expérimentaux d'un facteur 2 au maximum. Il faut tout de même rappeler que les incertitudes des mesures et des calculs sont importantes, surtout dans les cibles épaisses. Une tendance similaire est observée pour une cible en aluminium (Figure 21), alors que pour des cibles plus lourdes les calculs MCNPX tendent à surestimer les rendements neutroniques (au maximum d'un facteur 2).

Dans les deux cas étudiés, les calculs sont proches des résultats expérimentaux pour les neutrons de basse énergie. Pour des neutrons de plus haute énergie, on remarque des écarts plus significatifs mais les incertitudes sont relativement grandes que ce soit pour les simulations ou les données expérimentales (~30 %). De plus ces neutrons sont en quantités très faibles et, comme nous l'avons déjà dit, n'influenceront que très peu les calculs d'activation.

ANNEXE 2

Plans et géométries utilisés

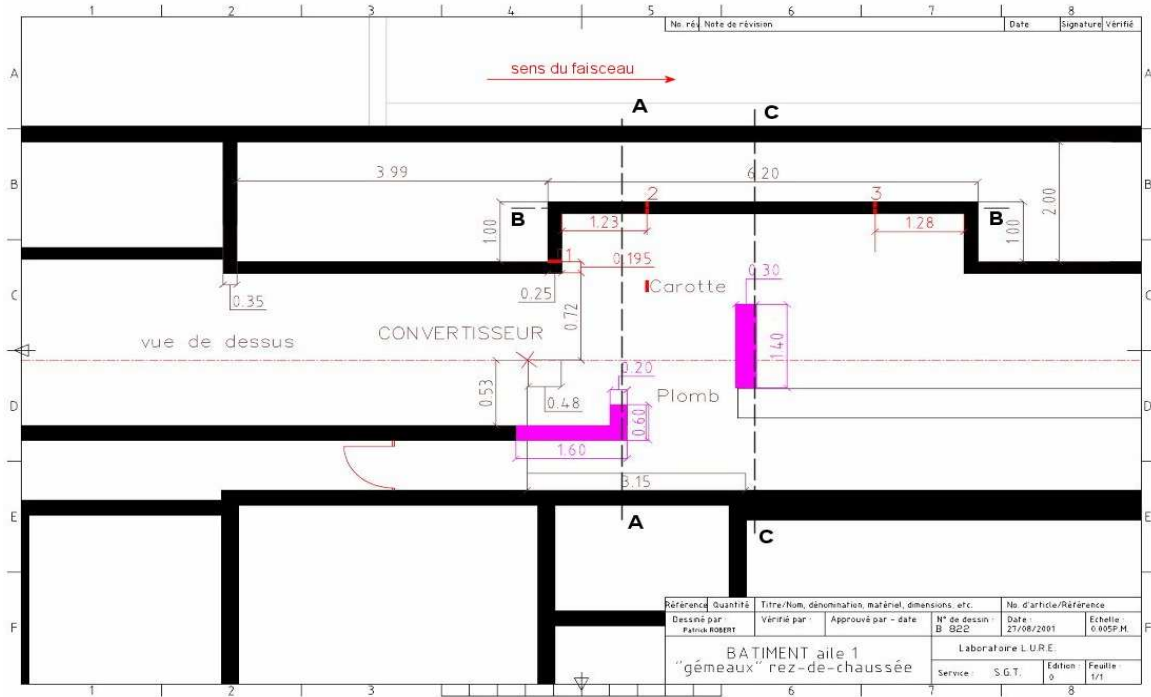


Fig. 22. Plan de la zone convertisseur.

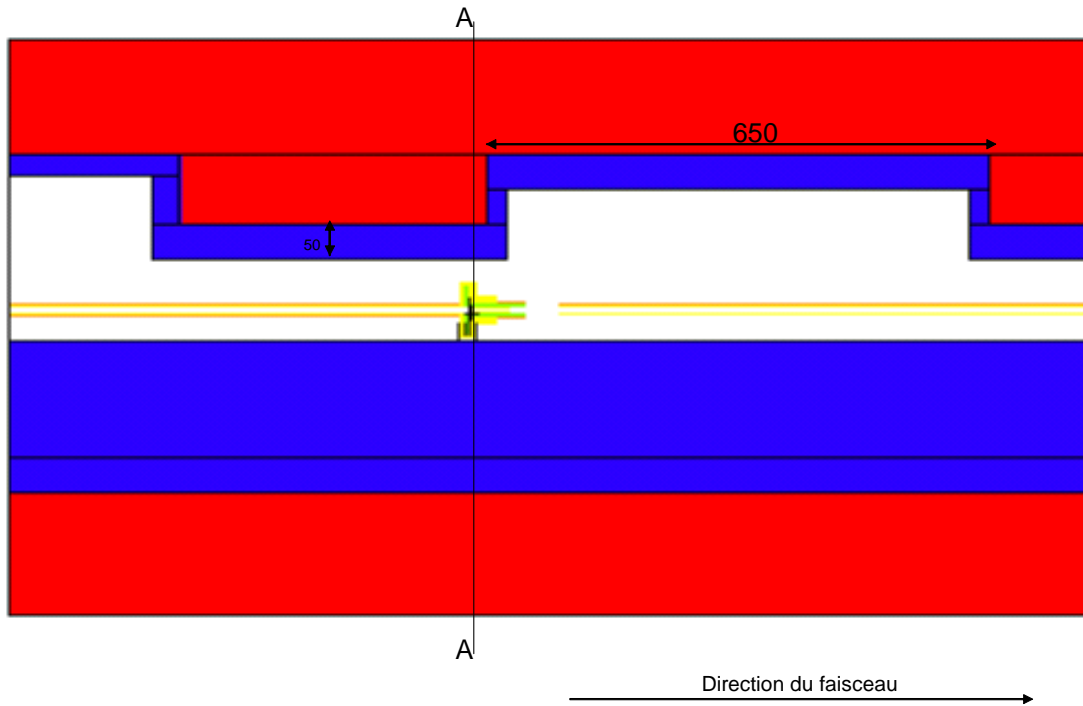


Fig. 23. Tranche de la zone du convertisseur vue de dessus.

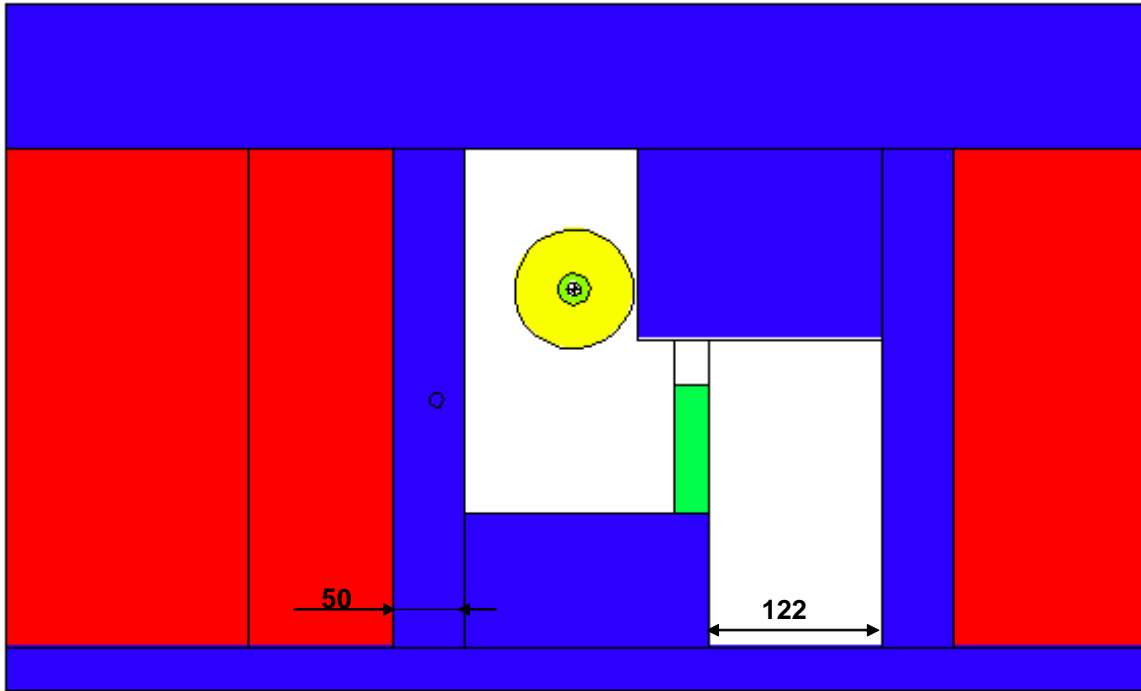


Fig. 24. Géométrie salle convertisseur – coupe AA.



Fig. 25. Schéma de la structure entourant la cible (en bleu).

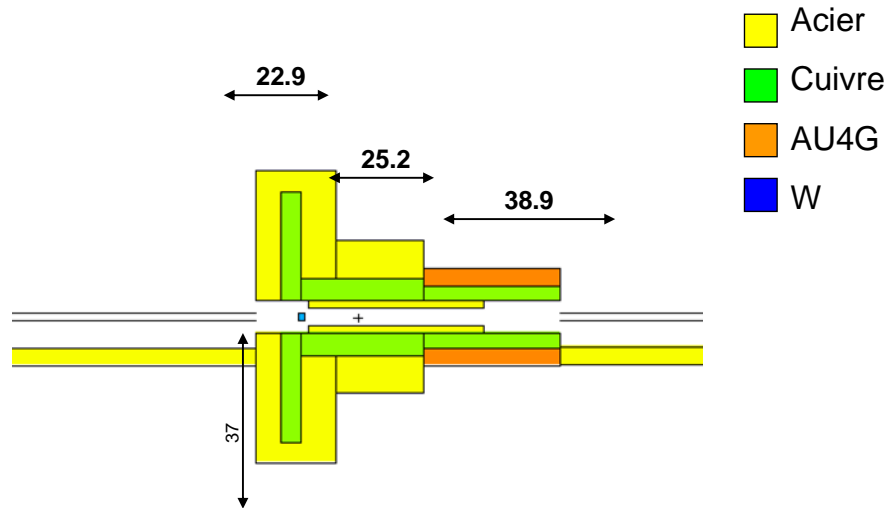


Fig. 26. Schéma du convertisseur utilisé dans les simulations.

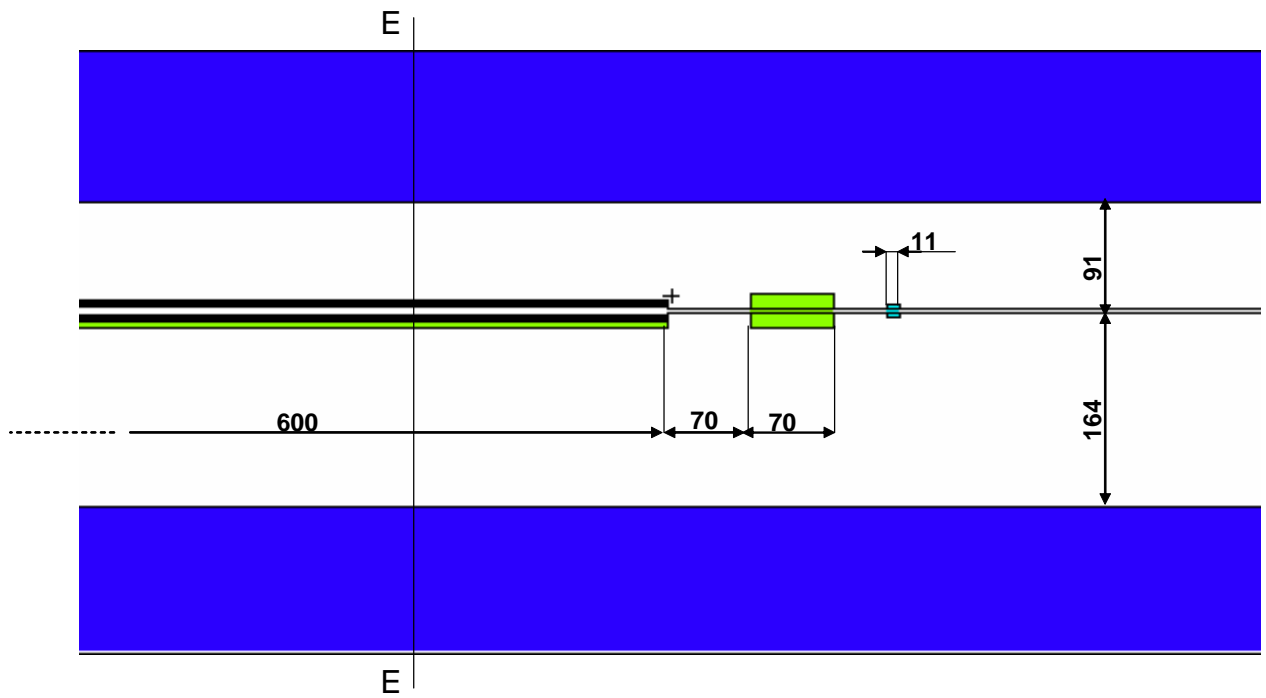


Fig. 27. Section 8 - coupe selon la verticale.

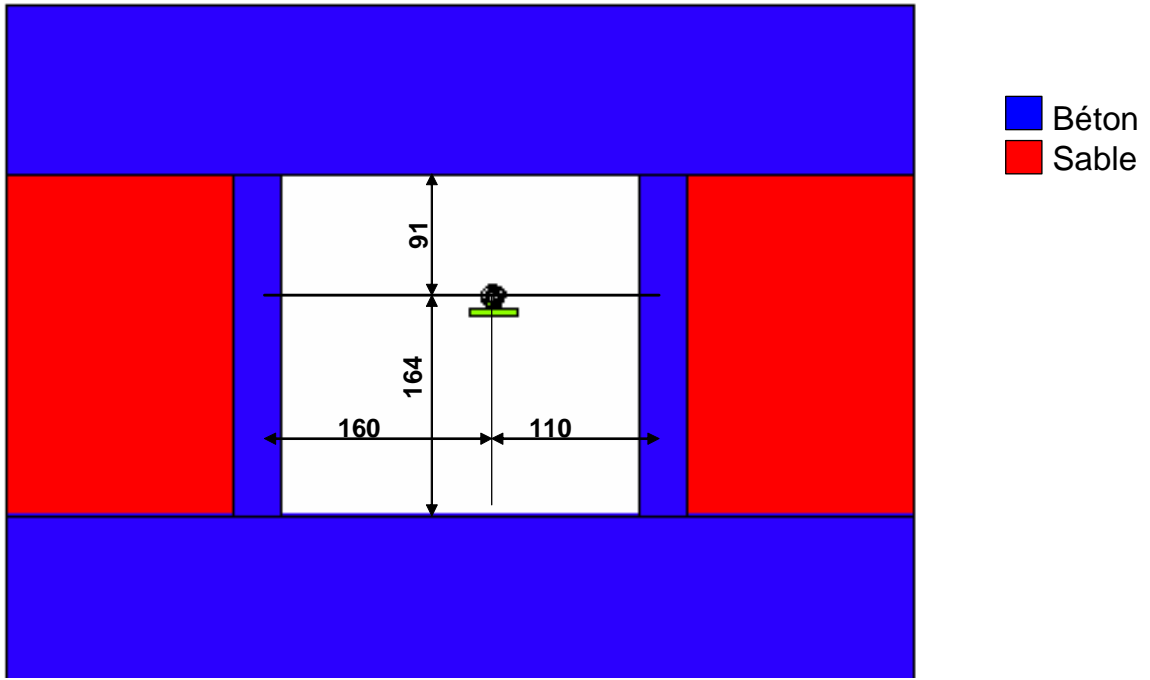


Fig. 28. Section 8 - coupe selon la AA.

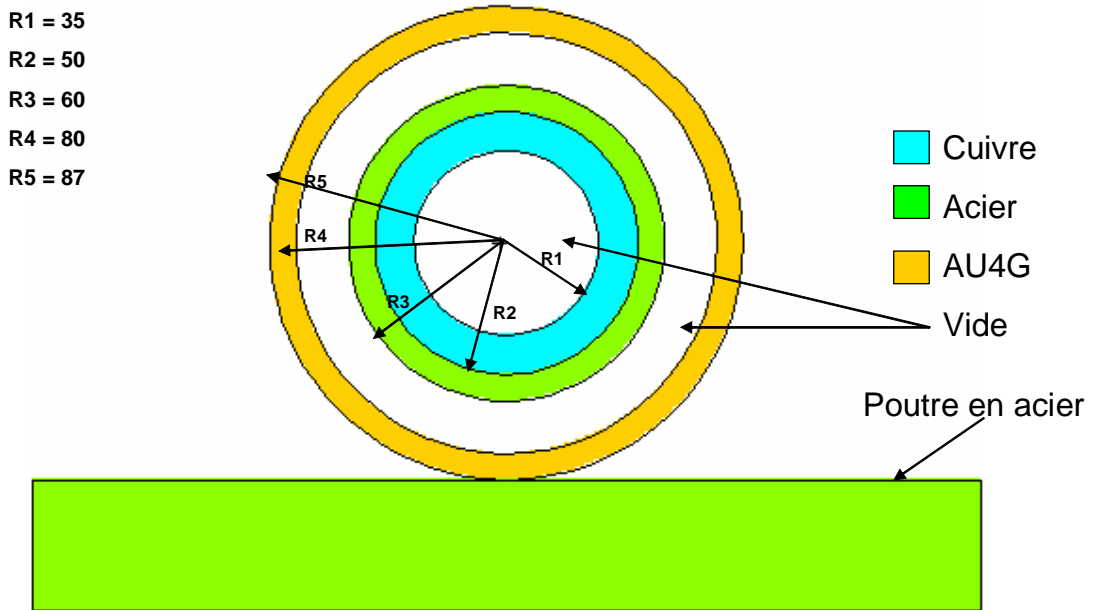


Fig. 29. Section 8 - coupe du tube.

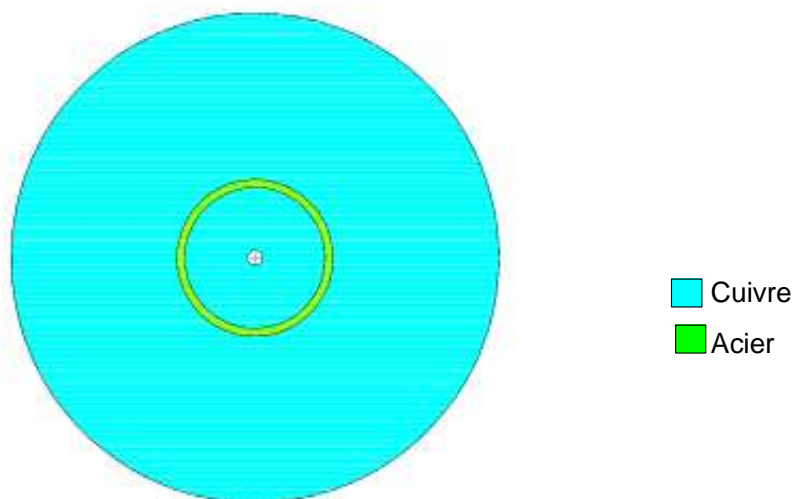


Fig. 30. Section 8 - coupe de l'IRIS.

ANNEXE 3

Composition des différents matériaux

Compositions Convertisseur Section 8

matériaux	pourcentage	matériaux	pourcentage
tungstène	0,1	cuivre	80%
inox	20	inox	20%
cuivre	40		
acier	10		
aluminium	10		
epoxy	5		
plomb	14,9		
Total	100		

Tab. 8. Composition des convertisseurs.

aciers inoxydables

	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
X2CrNiMo19,12	64,40%	0,03%	2%	1%	<0,045%	<0,03%	16-18%	12,5-14%
X2CrNi18,10	68,90%	0,03%	2%	1%	<0,04%	<0,03%	17-19%	9-11%

aluminium AG5M

	Cu	Mn	Si	Fe	Mg	Zn	Cr	Ti+Zr	Al
AG5M	0,10%	5,50%	0,40%	0,50%	1%	0,20%	0,40%	0,20%	93,50%

acier type P265GH

	Fe	C	Mn	Si	S	P	Cr,Ni	Al
P265GH	98,60%	0,18%	0,70%	0,40%	0,01%	0,01%	traces	0,08%

fer doux

	C	P	S	Mn	Cu	Fe
fer doux	0,02%	0,02%	0,42%	0,15%	0,15%	99,70%

plomb

	Pb	Sb	Ag	Cu	Fe	Zn	Bi
plomb	94,900%	5,000%	0,020%	0,080%	0,002%	0,001%	0,005%

cuivre type ASTM B170 grade 1

	Cu	Fe	Ni	Ag	traces de : Sb, As, Bi, Cd, Pb, Mn, O, P, Se, S, Te, Sn, Zn : quelques ppm
cuivre type ASTM B170 grade 1	99,99%	10 ppm	10 ppm	25 ppm	

Tungstène (convertisseur)

	W	Cu	Ni
Tungstène (convertisseur)	96%	2%	2%

Tab. 9. Composition des différents métaux.

Composition fer à bétons

éléments	concentration (ppm)	erreur(%)
Ag	<1,9	
Al	<24	
As	574	0,4
Au	<0,0055	
Ba	<22	
Ba	<59	
Br	<0,49	
Ca	<1040	
Cd	<0,25	
Ce	<0,63	
Cl	<120	
Co	170	0,4
Cr	151	1,6
Cs	<0,052	
Cu	99	13
Dy	<0,94	
Er	<0,17	
Eu	<0,0059	
Fe	995000	0,1
Ga	16,9	1,8
Gd	<15	
Ge	<160	
Hf	<0,27	
Hg	<0,95	
Ho	<0,1	
In	0,6	
In	<31	
Ir	<0,0053	
K	<19	
La	0,102	0,4
Lu	<0,02	
Mg	<2000	
Mn	3150	0,2
Mo	17,1	1,5
Na	4,2	15
Nd	<2,9	
Ni	376	1,2
Pr	<1,7	
Rb	<1	
Ru	<1,7	
Sb	3,2	33
Sc	<0,0024	
Se	<2,7	
Sm	<0,01	

Tab. 10. Composition des fers à béton

Sn	<22	
Sr	<30	
Ta	<0,043	
Tb	<0,023	
Te	<4	
Th	<0,02	
Ti	<390	
Tm	<0,16	
U	<0,05	
V	5,4	2,5
W	0,33	6,1
Yb	<0,13	
Zn	<2	
Zr	<15	

Tab. 11. Composition des fers à béton (suite)

Composition des bétons

Section 8

Convertisseur

Eléments majeurs	Concentration (ppm)	erreur(%)
Al	11900	7
C	6709	10
Ca	58399	2
Fe	7465	7
H	5700	
K	3790	9
Mg	1803	17
Na	753	7
O	528348	
S	1400	10
Si	371829	1
total majeurs	998096	

Eléments majeurs	Concentration (ppm)	erreur(%)
Al	16922	7
C	51764	10
Ca	220731	2
Fe	7554	7
H	6356	
K	6655	12
Mg	3031	14
Na	1293	7
O	504231	
S	1400	10
Si	178248	1
total majeurs	998185	

Eléments mineurs	Concentration (ppm)	erreur(%)
As	4,9	14
B	18	10
Ba	112	9
Be	<0,9	
Bi	<0,05	
Br	0,9	9
Cd	<0,15	
Ce	22,4	5
Cl	<76	
Co	4	11
Cr	15,25	14
Cs	1	12
Cu	10	20

Eléments mineurs	Concentration (ppm)	erreur(%)
As	5,5	15
B	21	10
Ba	177	9
Be	<0,9	
Bi	0,11	10
Br	1,1	5
Cd	<0,15	
Ce	24,4	6
Cl	<58	
Co	3,8	11
Cr	22,2	14
Cs	2	12
Cu	15	20

Dy	1,9	9	Dy	2,1	7
Er	0,95	10	Er	1,26	10
Eu	0,46	12	Eu	0,54	12
Ga	2,79	10	Ga	3,96	10
Gd	2,29	6	Gd	2,41	6
Ge	0,89	15	Ge	0,72	15
Hf	0,955	7	Hf	1,09	9
Ho	0,39	10	Ho	0,54	8
I	<4		I	<5,5	
In	<0,53		In	<2,8	
La	10,8	7	La	11,7	7
Li	41	10	Li	19	10
Lu	0,157	8	Lu	0,1915	8
Mn	269	4	Mn	373	4
Mo	1	14	Mo	0,6	24
Nb	1,6	5	Nb	2,5	5
Nd	10,1	9	Nd	10,4	9
Ni	10,3	9	Ni	11	12
P	<85		P	<85	
Pb	7,3	10	Pb	8,1	10
Pr	2,8	5	Pr	3	5
Rb	20	7	Rb	43,6	20
Sb	0,461	6	Sb	0,42	8
Sc	4,27	4	Sc	4,55	5
Sm	2,2	7	Sm	2,2	7
Sn	0,51	10	Sn	1,06	10
Sr	121	11	Sr	266	9
Ta	0,145	10	Ta	0,215	11
Tb	0,34	11	Tb	0,37	12
Th	3,59	5	Th	4,09	5
Ti	399	22	Ti	602	18
Tm	0,155	10	Tm	0,204	10
U	0,82	7	U	1,285	7
V	29	9	V	36	9
W	1,4	12	W	0,33	14
Y	12	5	Y	14	5
Yb	0,91	11	Yb	1,22	11
Zn	20	11	Zn	21	13
Zr	47	5	Zr	49	5
total mineurs	1215,933		total mineurs	1771,7655	
total	999311,933		total	999956,7655	

Tab. 12. Composition des bétons.

ANNEXE 4

Activation de la zone convertisseur

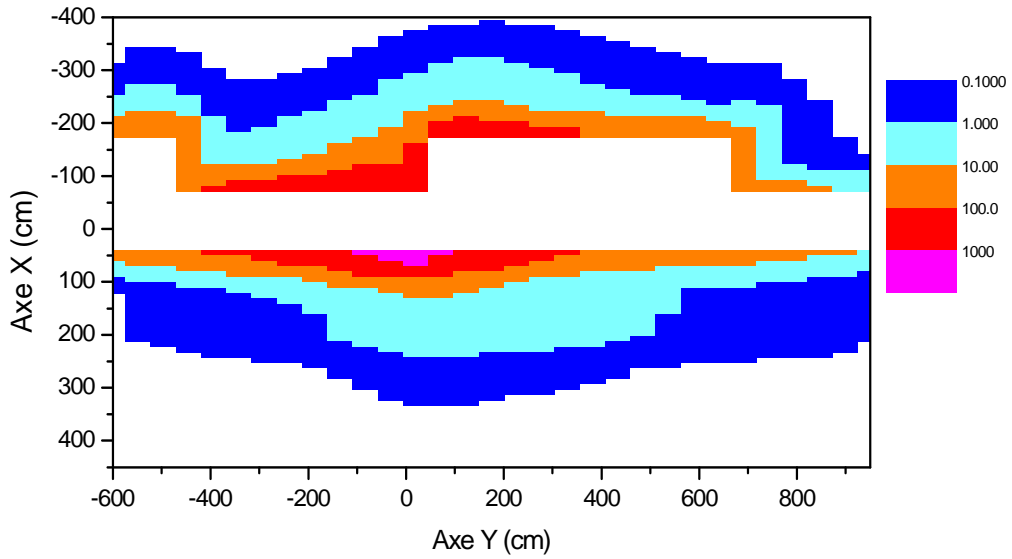


Fig. 31. Activation totale de la zone du convertisseur (Z=0) en (Bq/g).

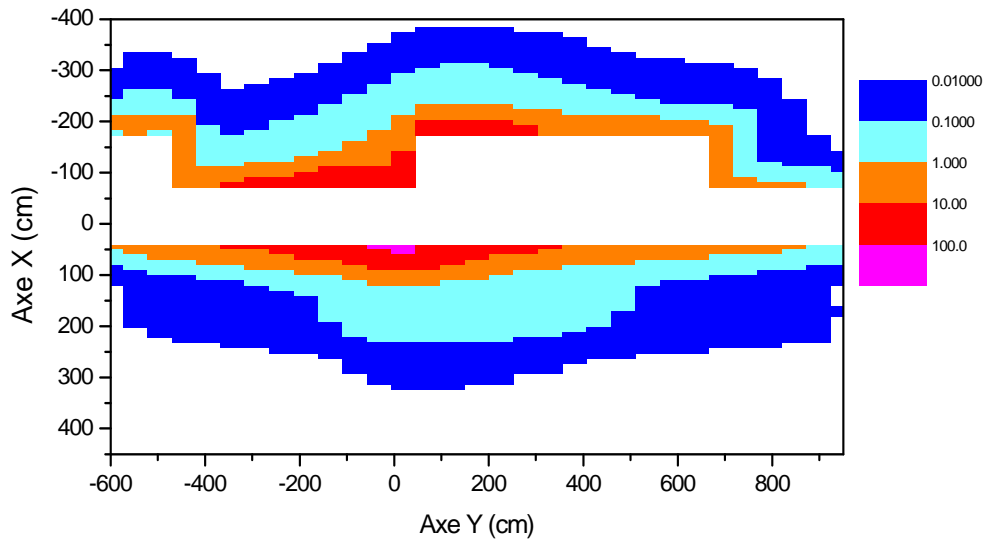


Fig. 32. Activation de l'acier dans la zone du convertisseur (Z=0) en (Bq/g).

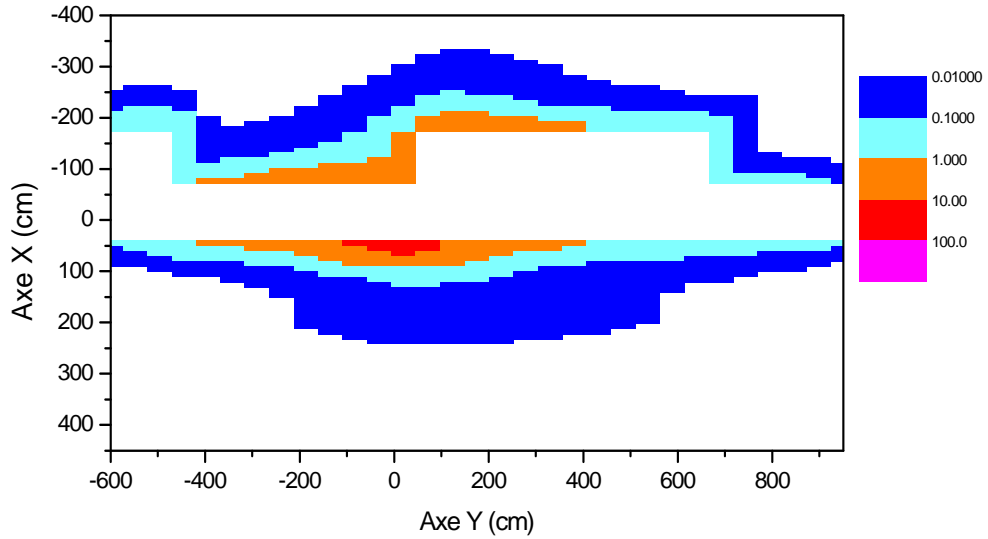


Fig. 33. Activation du béton dans la zone du convertisseur (Z=0) en (Bq/g).

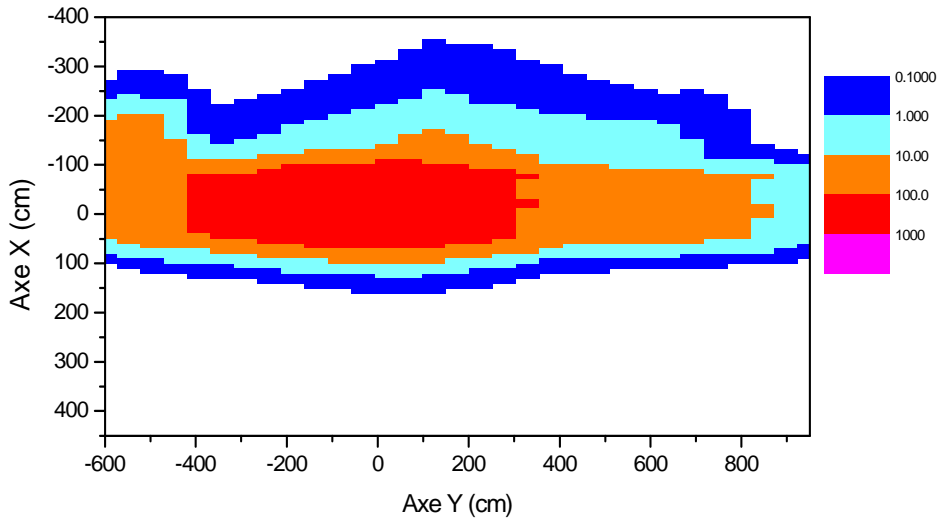


Fig. 34. Activité totale de la zone convertisseur (Z=40) en (Bq/g).

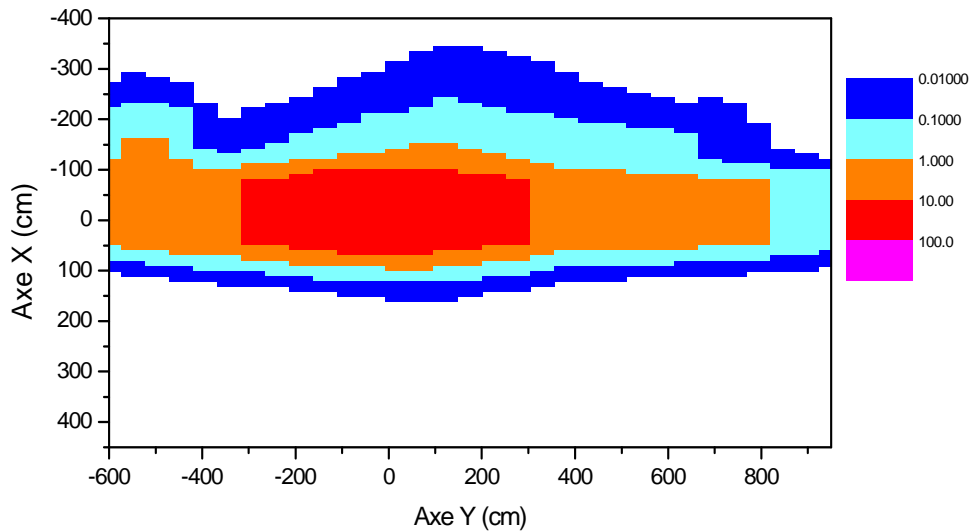


Fig. 35. Activité de l'acier de la zone convertisseur (Z=40) en (Bq/g).

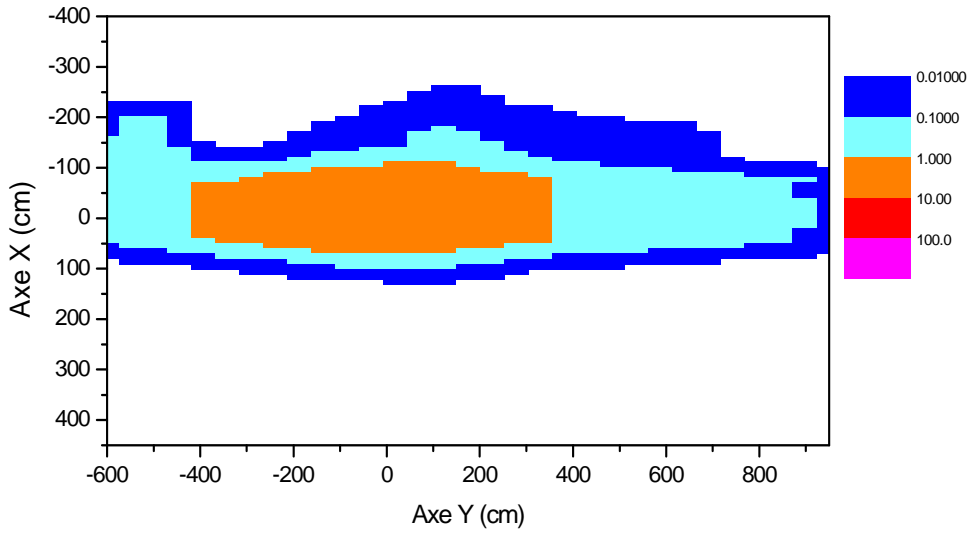


Fig. 36. Activité des bétons de la zone convertisseur (Z=40) en (Bq/g).

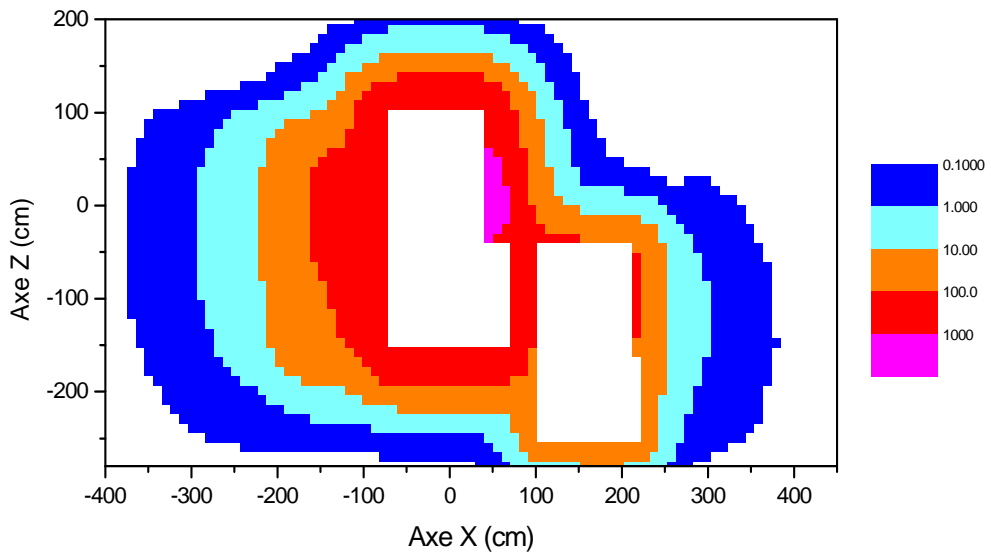


Fig. 37. Activité totale de la zone convertisseur (Y=0) en (Bq/g).

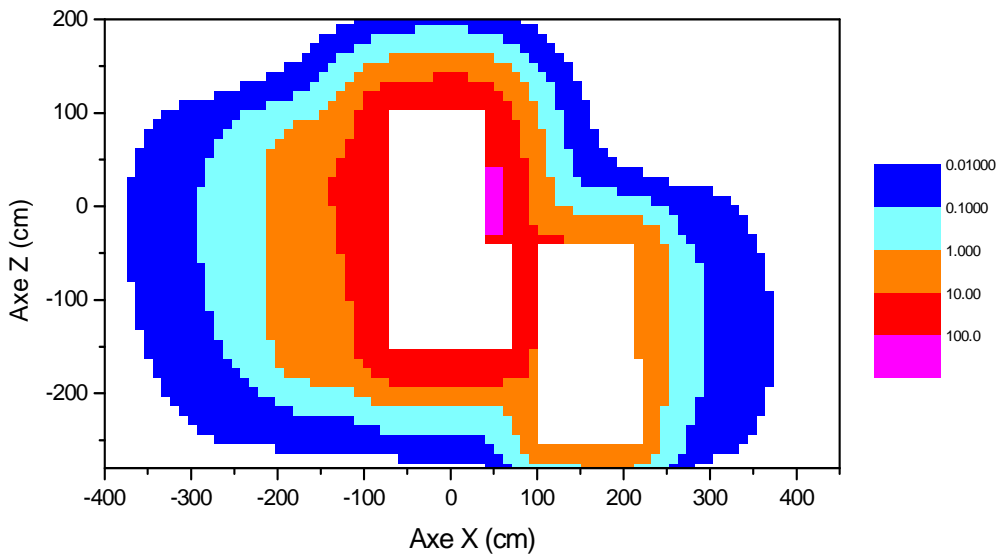


Fig. 38. Activité de l'acier de la zone convertisseur (Y=0) en (Bq/g).

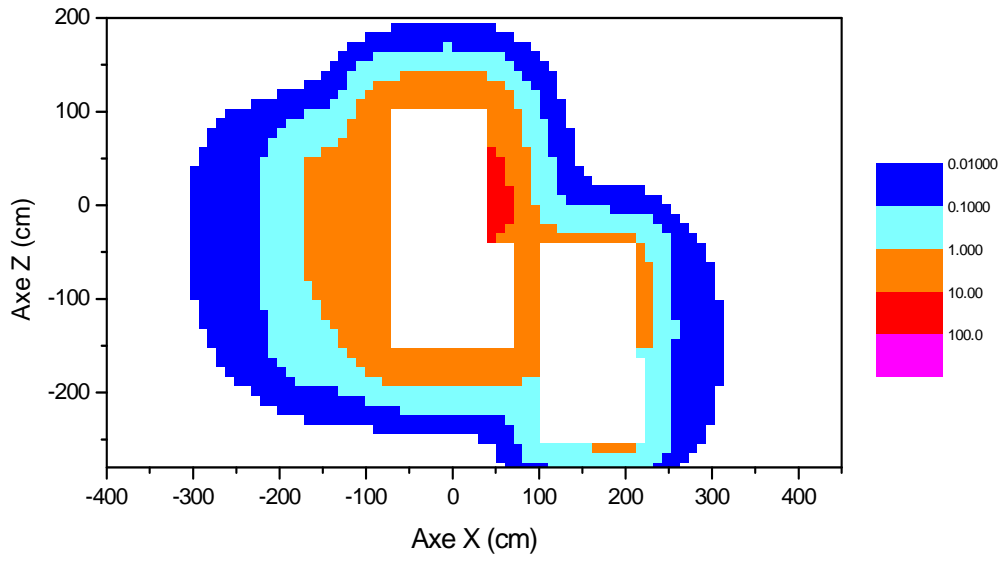


Fig. 39. Activité des bétons de la zone convertisseur (Y=0) en (Bq/g).

ANNEXE 5

Activation de la section 8

Sauf pour la coupe dans le plan faisceau ($Z=0$) toutes les coupes présentées ici sont effectuées dans les plans les plus activés.

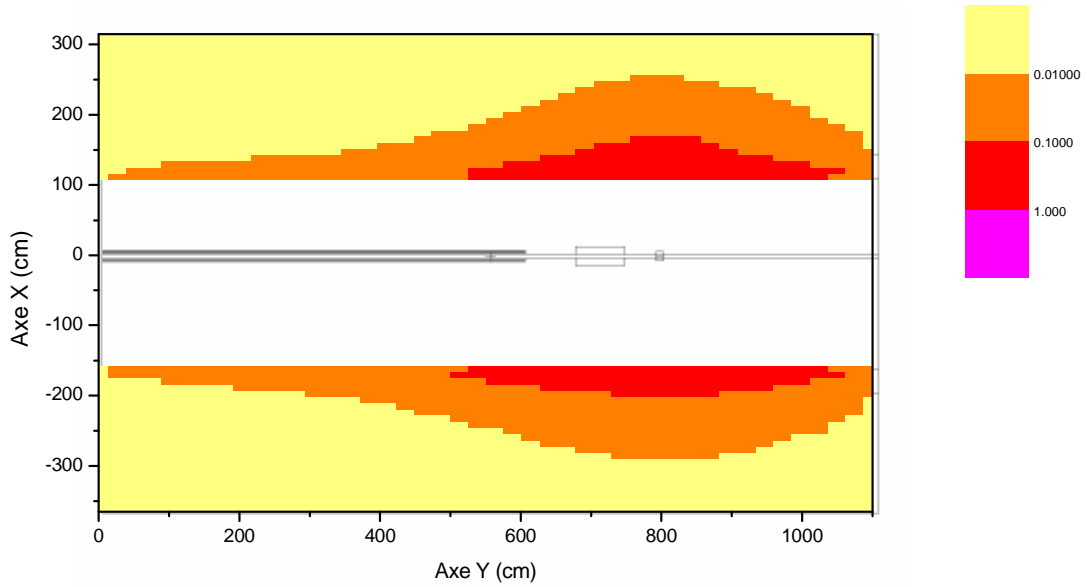


Fig. 40. Activation totale de la section 8 (coupe $Z=0$) en (Bq/g).

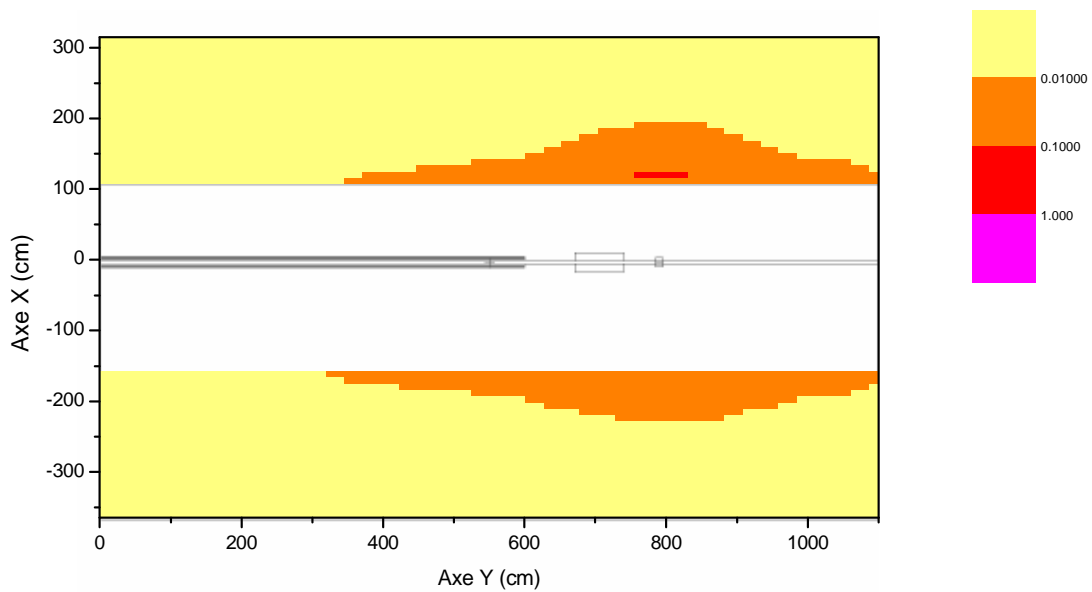


Fig. 41. Activation du fer de la section 8 (coupe $Z=0$) en (Bq/g).

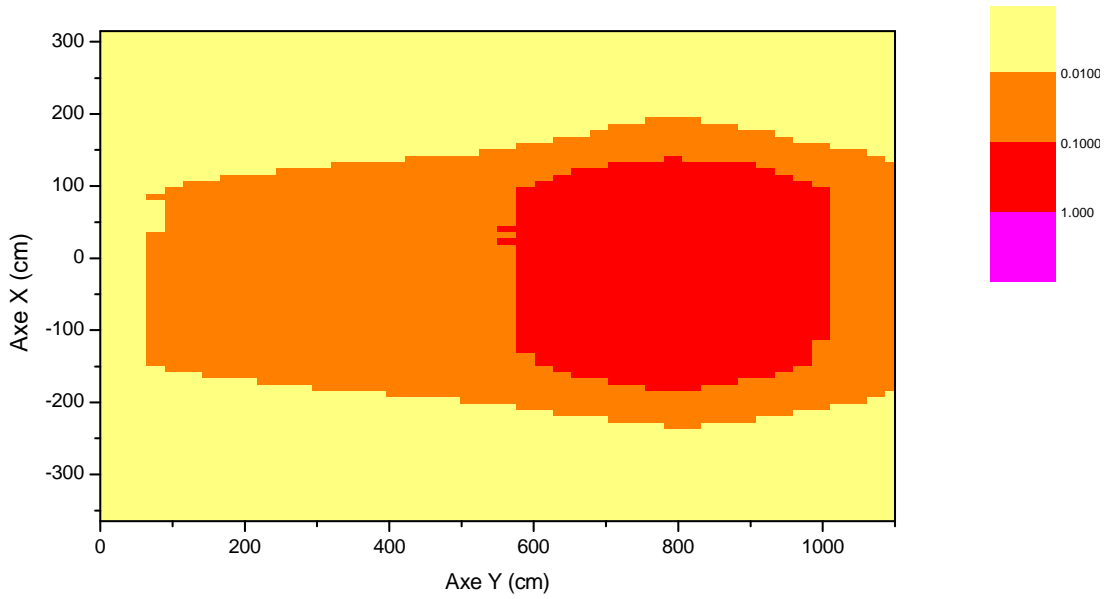


Fig. 42. Activation totale de la section 8 (coupe Z=100) en (Bq/g).

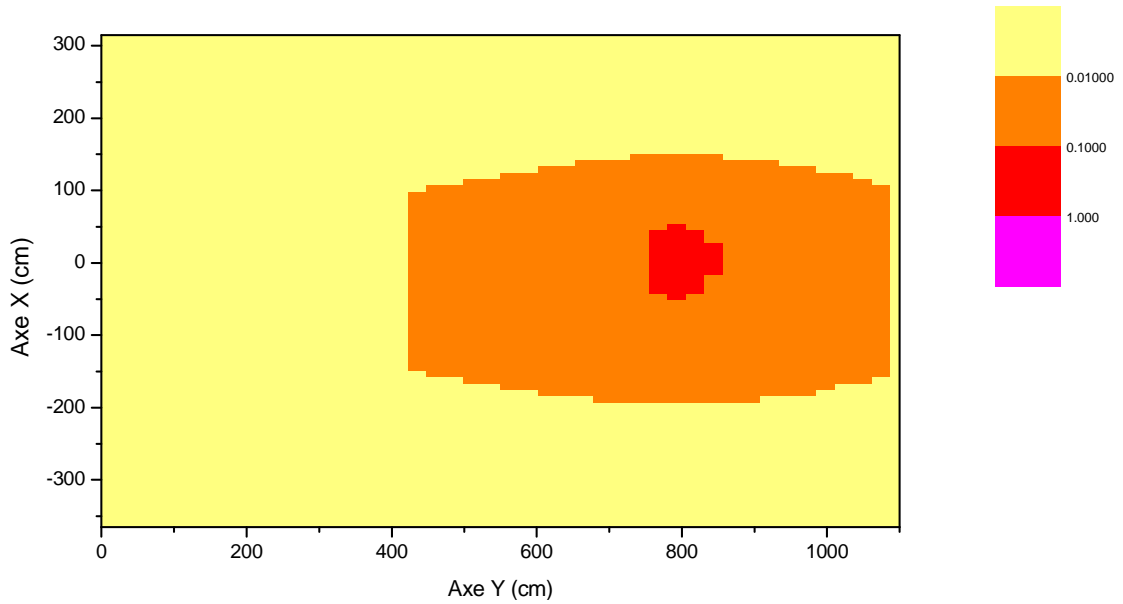


Fig. 43. Activation de l'acier de la section 8 (coupe Z=100) en (Bq/g).

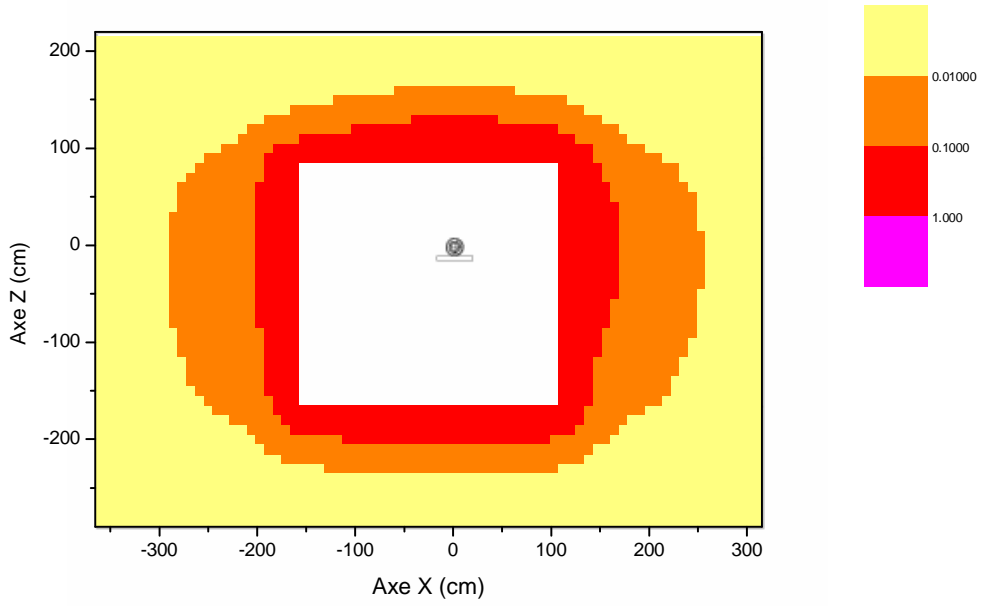


Fig. 44. Activation totale de la section 8 (coupe Y=775) en (Bq/g).

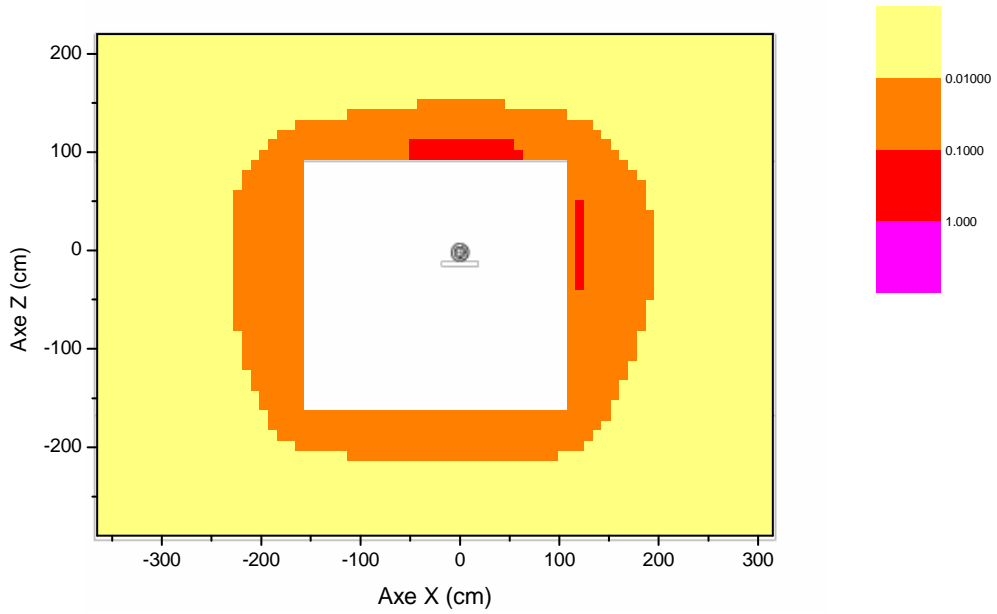


Fig. 45. Activation de l'acier de la section 8 (coupe Y=775) en (Bq/g).

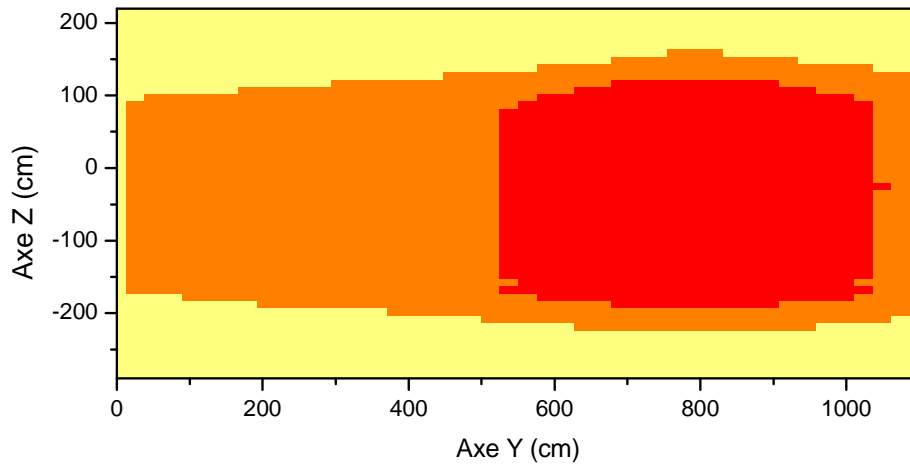


Fig. 46. Activation totale de la section 8 (coupe X=106) en (Bq/g).

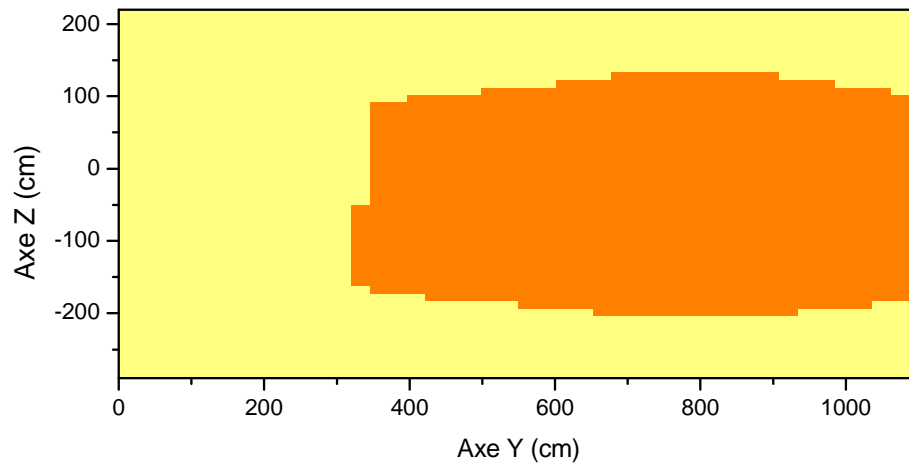


Fig. 47. Activation de l'acier de la section 8 (coupe X=106) en (Bq/g).