

---

# Introduction

---

## EVOLUTION DE L'INSTRUMENTATION UTILISÉE EN SPECTROMETRIE NUCLEAIRE

La période, dite des *Trente Glorieuses* (1945-1975), a façonné l'industrie mondiale avec l'apparition du mode de **consommation de masse** [1]. La recherche sur la miniaturisation des composants a été un des critères pour améliorer la rentabilité économique (performance/coût) de toute industrie liée à l'électronique, en se basant sur le bénéfice (sur le coût) qu'on acquerrait en réduisant la quantité de silicone utilisée

L'évolution de la technologie utilisée en instrumentation scientifique en général, et pour la spectrométrie nucléaire en particulier, est associée étroitement à celle de la micro-électronique ("Top-Down").

Moore Gordon avait ainsi prédit (en 1965) que le nombre de transistors par circuit de même taille allait doubler, à prix constants, tous les ans [2] (période rectifiée en 1975 à dix-huit mois, puis à deux ans aujourd'hui [3]).

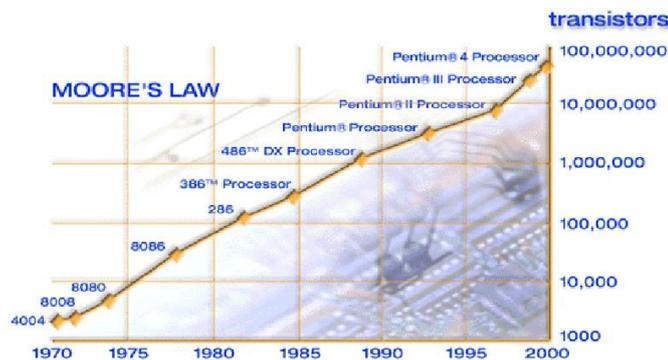


Figure 1: Le doublement des transistors tous les deux ans (la Loi de Moore) est maintenu chez INTEL au moins jusqu'à la fin de cette décennie grâce aux avancées technologiques [4]

Depuis une dizaine d'année, la technologie de l'électronique se heurte à deux principaux obstacles :

- Apparition des phénomènes quantiques

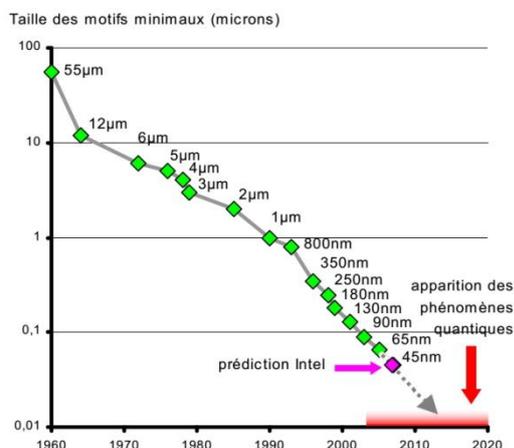


Figure 2 : Prédiction d'INTEL sur la taille des motifs de gravure des transistors CMOS [5]

- L'augmentation de la puissance consommée serait limitée par le problème de dissipation du flux thermique qui augmente exponentiellement et serait déjà sur la limite physique de la technologie MOS

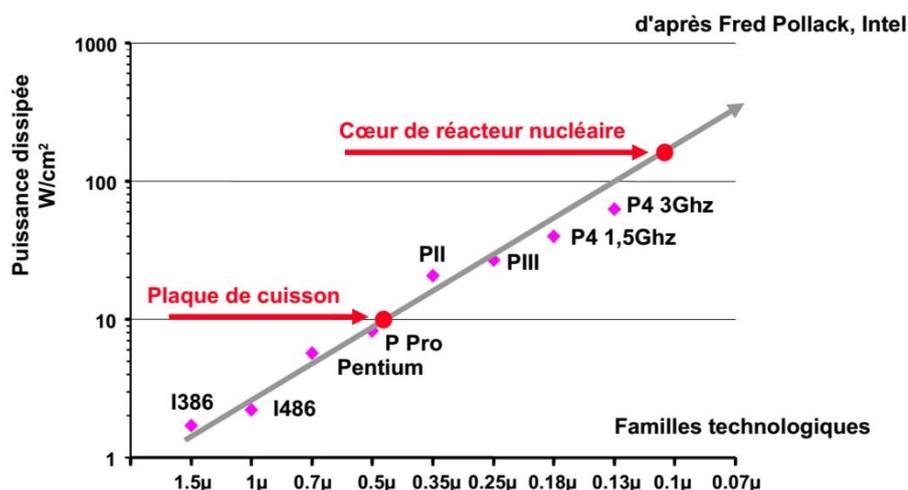


Figure 3 : Evolution de la puissance consommée suivant le rythme de la loi de Moore [6]

Les contraintes sont tellement pressantes (marché de concurrence, limitation technologique à l'échelle nanométrique) que la notion de performance a été nuancée pour considérer d'autres critères que l'échelle de miniaturisation : "More than Moore" (MtM) [7][8].

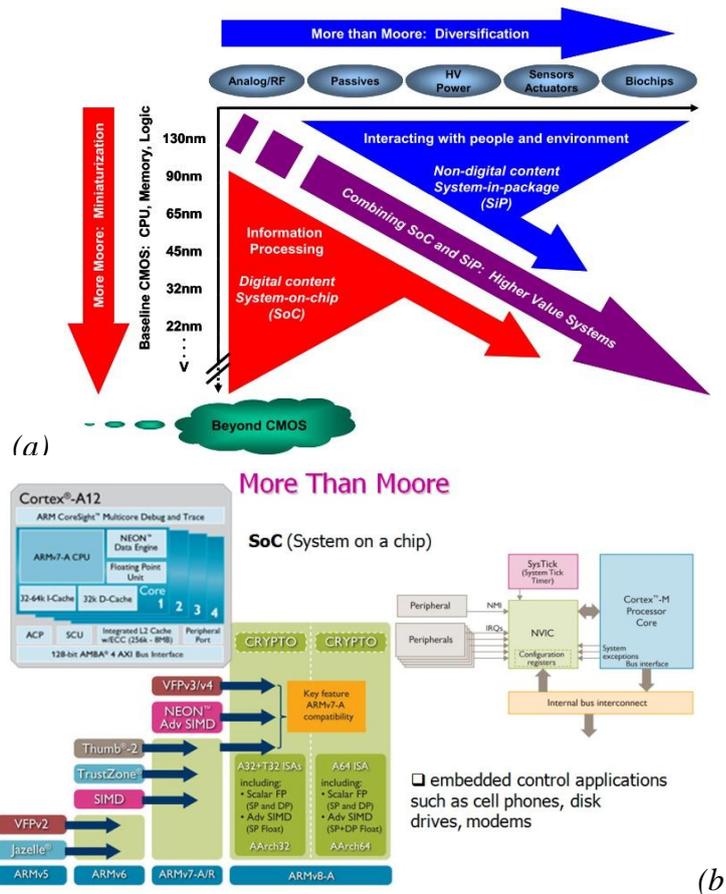


Figure 4 : a) Principe du concept "More than Moore" et b) exemple montrant l'implantation d'un système à l'intérieur d'un système numérique de mémoires

Seules les industries, à forte capacité de débouchés (domaines des ordinateurs, de la téléphonie) arrivent à s'investir sur des infrastructures de R&D et de leur rentabiliser.

On peut ainsi distinguer deux catégories d'industriels qui évoluent différemment l'une par rapport à l'autre :

- D'une part, les fabricants de puces électroniques (INTEL, ARM, XILINX, ALTERA), qui continuent à s'investir lourdement dans les infrastructures de R&D de haute technologie, mais coopèrent entre eux pour faire face au contrainte temps pour la mise sur marché des nouveaux produits [9].
- D'autre part, il y a les développeurs d'applications (Logiciels, équipements scientifiques, etc..), qui utilisent et dépendent des solutions électroniques déjà toutes faites, pour proposer des solutions technologiques dans des domaines spécifiques (comme la spectrométrie nucléaire, par exemple).

Pour les pays sous-développés, comme Madagascar, on pourra négocier au mieux cette situation, en sollicitant les compétences intellectuelles existantes. Toutefois il faudra trouver les moyens de s'acquérir des compétences technologiques en s'intégrant à des réseaux de coopérations et d'échanges internationaux (comme l'AIEA).

Même les développeurs d'instruments scientifiques de grande marque, comme CANBERRA, ne sont pas propriétaires de technologie, mais utilisent des solutions technologiques (entre autres des circuits d'intelligence en amont), qui sont propriétés d'autres compagnies telles INTEL, XILINX ou ALTERA.

La production de la puce électronique ZYNQ est un exemple de partenariat, associant deux technologies de l'électronique, que sont le FPGA (Artix7 de XILINX) et le PROCESSEUR (Cortex9 de ARM) [9].

Utilisant des composants à forte intégration de mémoires programmables (FPGA), la technologie DSP (Digital Signal Processing) est un exemple de solution technologique apportée pour un traitement plus approprié des signaux qui varient rapidement.

Avec la miniaturisation très poussée, les équipements scientifiques deviennent de plus en plus petits pour devenir portatifs (INSPECTOR de CANBERRA, DSPEC et digiDART-TM de ORTEC).



Figure 5 : Exemple d'instrument portable digi-DART de ORTEC

## LA SPECTROMETRIE NUCLEAIRE A L'INSTN-MADAGASCAR

Dans les années 1980, l'INSTN effectuait des campagnes de mesures pour évaluer les niveaux de radioactivité naturelle que la population malgache serait exposée. A cette époque, Le laboratoire LPNPA du Département de Physique de l'Université d'Antananarivo (qui est devenu INSTN-Madagascar en 1996) possédait déjà les instruments de base nécessaires pour accomplir ses missions. Les instrumentations que l'INSTN-Madagascar possède et utilise peuvent être classées suivant deux modes de fonctionnement distincts :

- Fonctionnement en mode d'impulsion (comptage d'impulsion par unité de temps)
- Fonctionnement en mode intégrateur (mesure de quantité de charge ou énergie transportée par unité de temps)

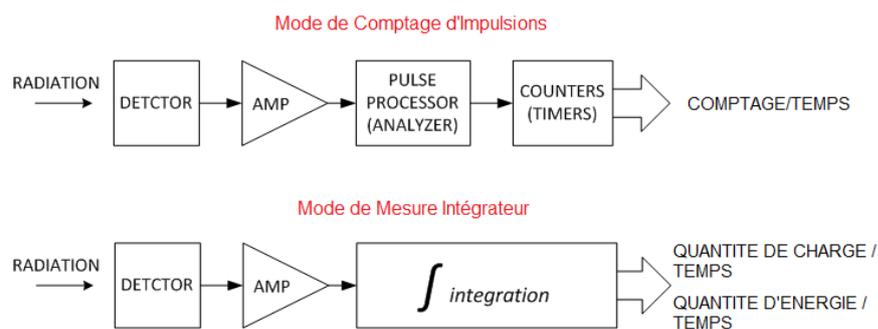


Figure 6 : Bloc diagramme d'un système de mesure fonctionnant  
a) en Mode d'impulsion et b) en Mode Intégrateur

La tendance de l'évolution de l'instrumentation en spectrométrie nucléaire en salle serait l'utilisation d'un ordinateur hôte pour la visualisation et l'analyse post-acquisition des spectres de haute résolution. Cependant les circuits de traitement des signaux en temps réel sont toujours nécessaires en amont pour améliorer le rapport signal/Bruit pour un meilleur décryptage de l'information véhiculée par les signaux.

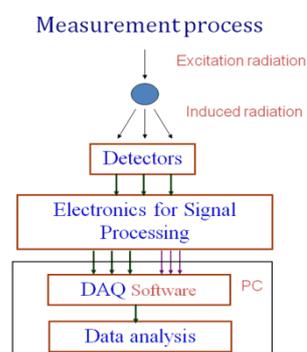


Figure 7 : Schéma Bloc d'un système d'acquisition pilotée par PC

Le type traitement à apporter sur les signaux dépend principalement du module de détection et de l'électronique associé. Le circuit intégrateur nécessaire pour la collecte des charges générées par le détecteur est le premier étage de mise en forme présent sur la chaîne.

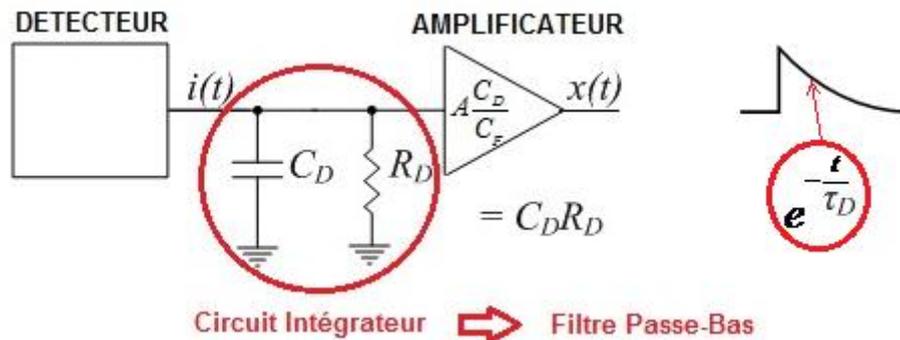


Figure 8 : Circuit de détection d'un système fonctionnant en mode Intégrateur

Il met en profile le signal dans sa forme initiale en exponentielle, dont la nécessité d'implanter d'autres types de traitement est fonction des besoins pour le décryptage des informations que l'on s'intéresse et qui sont véhiculées par les signaux collectés. La qualité du système dépend fortement de la performance de cette partie de la chaîne de traitement. La réponse est optimum pour une valeur maximum, du rapport Signal/Bruit possible. La quantification du bruit généré par les composants électroniques (*ENC*) et leur traitement par des circuits analogiques seront discutée au *Chapitre 3*. Tandis que le concept pour un système de traitement numérique sera traité dans le *Chapitre 4*.

## OBJECTIFS DE LA THESE

La technologie utilisée en instrumentation nucléaire se développe rapidement, suivant le rythme de l'évolution de l'industrie de l'électronique, selon la prédiction annoncée par Moore Gordon en 1965 [3] ("doublement d'intégration de densité de transistor dans un puce tous les dix-huit mois"). La méthode de maintenance des équipements scientifiques a aussi changé en conséquence car les composants électroniques discrets sont voués à disparaître, pour être remplacés par des modules programmables, dont les codes sont bloqués et cachés dans la majorité des cas.

Une stratégie adoptée par le Département de Maintenance et Instrumentation, au sein de l'INSTN-Madagascar pour garder en état de fonctionnement les anciennes générations

d'équipements et faire face au challenge emmené par l'évolution technologique, consiste à développer des activités de Recherches et de Développement technologiques. Les objectifs étant, d'une part de mettre à niveau les fonctionnalités de l'instrument ("refurbishment") et adapter la méthode de maintenance, d'autre part de s'acquérir des compétences nécessaires pour ces nouvelles technologies [10].

Ce qui nous a emmenés, depuis 2004 à faire des recherches et développement d'applications autour des composants configurables (*FPGA*). Un de ces applications, faisant partie de ce travail de thèse, est la synthèse numérique dans un *FPGA* de la méthode classique de mesure et de classification des amplitudes d'impulsions (*PHA*) [11].

Outre la recherche de solution technologique pour la maintenance des instruments scientifiques, un autre objectif visé par ce travail serait la vulgarisation et le transfert de connaissance pour la communauté scientifique malgache, concernant ces nouveaux concepts d'instrumentation à traitement numérique des signaux.

Pour situer le champ d'application du présent travail, les deux premiers, ***Chapitre 1*** et ***Chapitre 2*** de ce manuscrit, présentent les principes de base de la spectrométrie nucléaire : le cheminement des signaux le long de la chaîne et les traitements nécessaires pour améliorer le décryptage de l'information véhiculée par les signaux électrique, à travers les expériences établies avec l'évolution de la spectrométrie au sein de l'INSTN-Madagascar.

Le ***Chapitres 3*** présente les paramètres pouvant caractériser la qualité des traitements des signaux, ainsi que les techniques analogiques d'optimisation possibles. Les méthodes standards pour l'évaluation d'une chaîne de spectrométrie nucléaire, y sont aussi présentées.

Le concept d'un système de traitement des signaux totalement numérique est développé dans les chapitres, ***Chapitre 4*** et ***chapitre 5***, dont la méthode de conversion et de synthèse numérique des signaux en spectrométrie gamma, et les considérations à tenir compte relatives à la portabilité des codes de programmes à travers des plateformes différentes. La prise en main des outils d'interface et de synthèse virtuelle pour la validation est discutée dans le ***Chapitre 6***.

Les résultats obtenus montrent que la performance du système numérique est tout à fait comparable à celle des instruments standards de grande marque, et qu'il présente l'avantage de la portabilité des codes suivant les performances demandées (adaptation) et de la plateforme existante.

# Chapitre 1

---

## Instrumentation Nucléaire au sein de l'INSTN-Madagascar

---

La présence des minerais radioactifs dans le sous-sol malgache de la région anciennement appelée Fort-Dauphin, a été identifiée pendant l'ère de la colonisation française. Les Monazites

On peut citer par exemple, le site d'Antete, qui a été exploité par le CEA et la compagnie SOTRASSUM pendant la période entre 1959 à 1963 [12], avant de le laisser à l'abandon.

Face à l'intérêt économique suscité par les Monazites de Madagascar, les scientifiques commençaient aussi à se pencher sur les méthodes de caractérisation de ces minerais. Les chercheurs du Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique Appliquée (LPNPA), du Département de Physique de l'Université de Madagascar, et dirigé par le Professeur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, effectuaient des travaux de terrain pour la collecte d'échantillon dans la région afin d'y faire une série de mesures de caractérisation.

Des équipements scientifiques ont pu être acquis grâce à la coopération avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA-Vienne), dont la première chaîne d'acquisition au détecteur Germanium dopé au Lithium. Un des premiers résultats de recherche, a été publié en 1979 [13].

Depuis, le laboratoire LPNPA qui changeait de statut en 1996 pour s'acquérir d'une autonomie administrative et financière, pour devenir en institut national dénommé Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), n'a pas cessé d'évoluer et a renforcé ses parcs de matériels scientifiques en fonction des différentes activités qui lui sont assignés.

Les activités de recherches développées par l'INSTN-Madagascar, se sont toujours développées en suivant l'évolution des normes méthodologiques d'instrumentation de l'AIEA (utilisation rationnelle des isotopes radioactifs) et aussi conforme aux besoins et contexte locaux (protection et bien-être de la population dans son milieu).

Pour la mesure des radioéléments, les instrumentations que l'INSTN-Madagascar utilisait, peuvent être de deux types : soit d'un simple compteur logique d'impulsion, ou d'un système de spectrométrie linéaire, fonctionnant en mode d'impulsion (nombre d'impulsions par unité de temps) ou en mode intégrateur (mesure de la quantité de charge générée par unité de temps).

## 1. COMPTAGE LOGIQUE D'IMPULSIONS

### 1.1. Détecteur d'onde sonore

Tout au début de son existence, un des majeurs soucis de l'équipe de chercheurs du LPNPA fût de statuer sur le niveau de radioactivité ambiante qui exposerait la population, sachant que la constitution du sol malgache contient du Monazite [14].

Les résultats des mesures de la radioactivité naturelle, de type gamma, au niveau du sol aux environs d'Antananarivo, furent publiés en 1978, utilisant un appareil de "gammaphone" [15].

Le principe de fonctionnement de l'appareil de mesure consiste à convertir dans la gamme de la fréquence sonore les fréquences correspondantes à l'énergie des rayons gammas, pour les rendre audibles. Le signal sonore donne une information relative aux taux de radioactivité mais ne permet pas à une mesure qualitative ni quantitative de sa nature.

### 1.2. Détecteur Geiger-Muller

L'utilisation d'un appareil de détection à Geiger-Muller, plus léger et donc portatif a permis d'avoir une meilleure approche pendant les travaux de terrains. En effet en tant que scientifiques avertis sur la présence des isotopes radioactifs dans la constitution du sous-sol de Madagascar, les chercheurs du LPNPA utilisaient ces appareils pour avoir une première estimation du niveau de la radioactivité du milieu ambiant.

Il permet d'indiquer, en émettant un signal audible, la présence de rayonnements ionisants (localiser la présence de minerai d'uranium), sans toutefois donner une information précise sur la nature et la concentration de ces isotopes radioactifs.

### 1.3. Débit-mètre (ratemeter)

Pour avoir une première approximation sur l'état du milieu ambiant, on peut utiliser un débitmètre, qui donne des informations visuelles (affichage analogique ou numérique) sur le niveau de radioactivité globale.

## 2. COMPTAGE LINEAIRE D'IMPULSIONS DE RAYONNEMENTS IONISANTS

### 2.1. Mesure de la radioactivité naturelle

Une étude plus élargie sur le niveau de radioactivité du sol malgache a été menée en 1981 et 1982, avec une campagne de mesures plus complète et utilisant un appareil à échelle graduée ayant permis à la lecture de l'intensité de la radioactivité [16]. De même le niveau de la radioactivité en altitude a pu aussi être mesuré [17]. La mémorisation des données mesurées se faisait encore à la main.

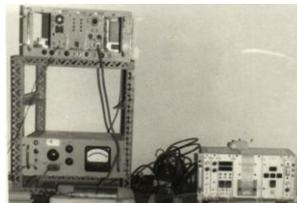


Figure-1. 1 : Echelle de comptage

Une version d'échelle de comptage, réalisée par les chercheurs du Département Electronique Nucléaire (actuellement dénommé Maintenance et Instrumentation Nucléaire) utilisant quatre détecteurs GM, a été développée pour être utilisée dans un laboratoire comme détecteur d'anomalie.



Figure-1. 2 : Compteur Geiger-Muller à 4 voies  
(Développé par LPNPA)

Les caractéristiques majeures des instruments de mesure de la radioactivité naturelle, que l'INSTN-Madagascar dispose, sont résumées dans le tableau-1.1 ci-dessous.

Tableau-1. 1 : Chaîne de comptage radiométrique

Electronique associé : Modules NIM	Type de Traitement sur le signal d'informations Analogique	Numérique	Analyse sur L'impulsion
<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMPLI</li> <li>• TIMER/COUNTER</li> <li>• PRINTER</li> </ul>	Filtre de GAUSS	Aucun	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence (cps)</li> <li>- Localisation temporelle (date/temps)</li> </ul>

## 2.2. Comptage sélectif dans une gamme d'énergies (SCA)

En complémentarité des résultats obtenus par une mesure globale de la radioactivité, on pourrait ne s'intéresser seulement que pour une gamme d'énergies. Dans ce cas, un étage de discrimination, qui permet de fixer la région et la largeur de cette fenêtre d'énergies, est nécessaire.

L'instrumentation que l'institut utilisait pour ce type de mesures, et ce depuis 1978, est constituée de modules enfichables (NIM) dans un rack d'alimentation, dont un détecteur à scintillateur de type NaI(Tl), suivi d'un module multiplicateur de photon lumineux et de conversion (en charge) électrique (PMT).

Ainsi associée avec des modules NIM pour la mise en forme et l'analyse des données, des campagnes de mesures ont pu être effectuées, et emmenées par exemple à évaluer l'impact des paramètres météorologiques sur le niveau de la radioactivité naturelle d'énergies comprises entre 3MeV et 13Mev, à Antananarivo de Janvier 1978 à Mai 1984 [18]. Il en est de même sur la constatation d'une augmentation du taux de la radioactivité d'énergies comprises entre 4MeV et 5Mev en Mars 1986 [19].



Figure-1. 3 : Compteur NaI(Tl) associé avec les modules NIM de mise en forme et d'analyse des données (AMPLI 2012, SCA, TIMER/COUNTER, PRINTER)

Un traitement plus complet, utilisant la performance et le confort sur l'utilisation d'un modèle de MCA portatif pu être exploité pour l'établissement de cartes radiométriques de la région uranifères du Sud de Madagascar [20, 21].

Les différents types de traitement à apporter sur les signaux dans cette configuration de système de mesures sont énumérés à travers la table-1.2 ci-dessous.

Tableau-1. 2 : Chaîne de comptage spectrométrique

Electronique associé	Traitement des signaux électriques		Analyse des Impulsions
	Analogique	Numérique	
Détecteur NaI(Tl)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversion en charge électrique</li> </ul>	Aucun	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence (cps)</li> <li>- Localisation temporelle (date/temps)</li> </ul>
<b>Modules NIM</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMPLI</li> <li>• SCA</li> <li>• TIMER/COUNTER</li> <li>• PRINTER</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtre de Gauss</li> <li>• Elimination d'un P/Z</li> <li>• PUR</li> <li>• BLR</li> </ul>	Aucun	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence (cps)</li> <li>- Localisation temporelle (date/temps)</li> </ul>

### 2.3. Dosimétrie par la technique de la thermoluminescence

L'augmentation des services utilisant les techniques nucléaires dans différents secteurs d'activités, comme la médecine pour le traitement des cancers, ou l'industrie pour la radiographie, a emmené l'INSTN, depuis 1992 à renforcer ses capacités techniques pour pouvoir suivre la dose reçue par les personnels travaillant dans ces zones soumises sous rayonnements ionisants. [22]

La technique couramment utilisée pour pouvoir mesurer la dose d'exposition d'un individu est de lui faire porter une pastille (en Fluorure de lithium) avec laquelle l'énergie des rayonnements ionisants est piégée dans la structure cristalline et mettrait en défaut cette dernière.

La lecture de ces dosimètres en pastille (LiF) est effectuée en les chauffant de manière à ce que la structure revienne à son état initial et libérant la quantité d'énergie qui s'est trouvée piégée par thermoluminescence. La quantité de lumière ainsi restituée est proportionnelle à la dose reçue selon des conditions de mesure particulières. [23]

Tout au début de ses activités en radioprotection, l'INSTN-Madagascar dispose d'un lecteur TLD série-4000 de HARSHAW, pour assurer la surveillance dosimétrique des personnels de santé et des industries travaillant dans des zones exposées aux rayonnements ionisants. [24]

Le Département de Dosimétrie et de Radioprotection utilise actuellement un modèle récent (*Figure-1.4 : HARSHAW- 6600*) qui est plus performant, par rapport à l'ancienne, pour la gestion des cartes TLD. Cependant une sophistication plus poussée entraînerait aussi une complication en matière de maintenance.



Figure-1. 4 : Le lecteur de dosimètre TLD 6600

Tableau-1. 3 : Equipement dédié pour la lecture des détecteurs thermoluminescents

Désignation	Traitement des signaux électriques		Analyse des Impulsions
	Analogique	Numérique	
a) TLD-4000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convertisseur Courant/Fréquence</li> </ul>	Aucun	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence (cps)</li> <li>- Localisation temporelle (date/temps)</li> </ul>
b) TLD-6600	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convertisseur Courant/Fréquence</li> </ul>	Aucun	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence (cps)</li> <li>- Localisation temporelle (date/temps)</li> </ul>

Pour renforcer la radioprotection dans les hôpitaux et centres médicaux, l'INSTN-Madagascar s'est doté d'infrastructures techniques adéquats (LSED) afin d'assurer la qualité et l'optimisation des doses administrées aux patients, sur les installations de diagnostic et de thérapie par rayonnements ionisants. Des activités de recherches ont été réalisées par les physiciens de l'INSTN-Madagascar pour simuler et mettre en place le protocole le plus adapté pour chaque type de traitement. [25, 26, 27]