

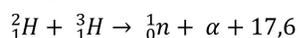
## Introduction

Le développement des techniques de détection des matières radioactives ou non dans le cadre de la lutte contre le trafic illicite des substances à risques, a commencé avec la découverte des rayonnements. En effet, la caractérisation d'un matériau se base généralement sur ses propriétés d'émissions de rayonnement (spontané ou provoqué). Actuellement, l'utilisation des photons X comme système d'inspection des objets est largement utilisé dans l'industrie conventionnelle. Néanmoins, les résultats de cette technique restent limités car elle donne seulement des informations sur la forme, la position et la densité des objets interrogés. Pour compenser cette lacune, l'expérience des opérateurs permet d'identifier les risques potentiels. Pour lever toute ambiguïté, on peut faire appel à d'autres techniques complémentaires qui fournissent des informations plus précises sur la matière inspectée, notamment l'utilisation des neutrons rapides comme moyen d'interrogation. En raison de leurs forts pouvoirs de pénétration et de leurs capacités à exciter les noyaux des matériaux inspectés et identifier leurs compositions chimiques. L'Union Européenne a lancé un projet appelé EURITRACK mené de 2002 à 2004, qui est un système de détection neutronique utilisant la technique de la particule associée pour des mesures non intrusives de la matière afin d'identifier les différents matériaux qui peuvent être dissimulés dans des conteneurs maritimes. **A quel point ce système d'inspection est-t-il performant ?**

## I Technique de la particule associée

Cette technique consiste à utiliser des neutrons rapides de 14 MeV (Tableau 1) pour inspecter la matière. Ces derniers excitent la matière qui génèrent des rayonnements gamma dont le spectre d'énergie dépend de la nature de la matière inspectée. La détection par des scintillateurs permet ainsi de remonter aux éléments chimiques constituant le volume inspecté.

Les neutrons rapides sont générés par la réaction de fusion Deutérium-Tritium :



Réaction	Energie totale (MeV)	Energie cinétique		Vitesse (cm/ns)	
		Neutron	Particule α	Neutron	Particule α
<b>t(d, n)α</b>	17,6	14,1	3,5	5,13	1,31

Tableau 1 : Caractéristique physique de la réaction **t(d, n)α** [2]

- La réaction de fusion deutérium-tritium, produit un neutron et une particule alpha « associée », émis approximativement à 180° l'un de l'autre.
- La particule alpha est détectée par un dispositif permettant sa localisation spatiale (dont la direction du neutron associé peut être ainsi déterminée).
- Connaissant la vitesse des neutrons, la distance D qu'il parcourt avant d'interagir avec un noyau cible est déterminée grâce à la mesure de leur temps de vol (TOF = time-of-flight) (Fig. 1) avec la relation:

$$TOF_n = t_2 - t_1 = t_\gamma - t_\alpha + TOF_\alpha - TOF_\gamma$$

$TOF_n$  = temps de vol du neutron depuis la cible tritiée jusqu'au lieu d'émission du rayonnement gamma,  
 $t_2$  = l'instant où le neutron engendre une réaction émettrice de rayonnement gamma dans l'objet inspecté,  
 $t_1$  = l'instant de l'émission d'un neutron,  
 $t_\gamma$  = l'instant de détection de la particule gamma,  
 $t_\alpha$  = l'instant de détection de la particule α,  
 $TOF_\alpha$  = temps de vol de la particule α depuis la cible tritiée jusqu'au détecteur α  
 $TOF_\gamma$  = temps de vol du rayonnement gamma depuis son lieu de production dans l'objet inspecté jusqu'au détecteur gamma

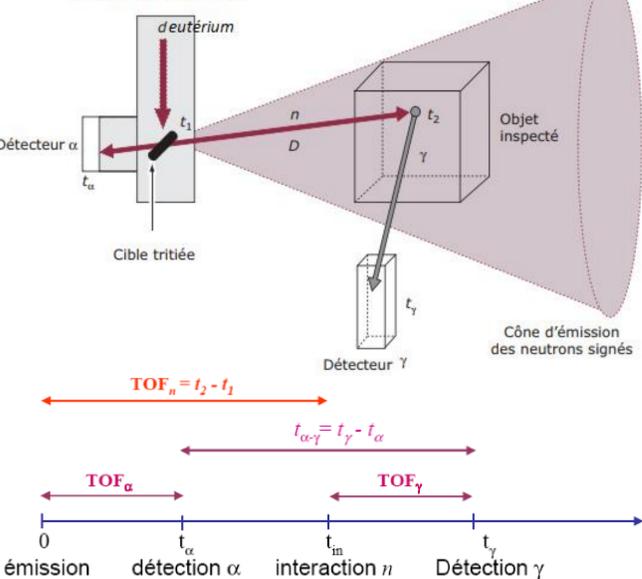


Figure 1 : Schéma du principe de détection par la technique de la particule associée [3]

## II Le système d'inspection EURITRACK

EURITRACK est un projet européen qui s'inscrit dans un programme de recherche et de développement technologique de 4,2M€ qui vise à accroître la sécurité des ports maritimes et limiter le trafic illicite.

Le concept de ce système d'inspection consiste à utiliser un scanner à rayons X comme principal moyen d'inspection. En cas de doute, le faisceau de neutron sera focaliser dans les zones suspectes en permettant de caractériser la matière (Fig. 2).

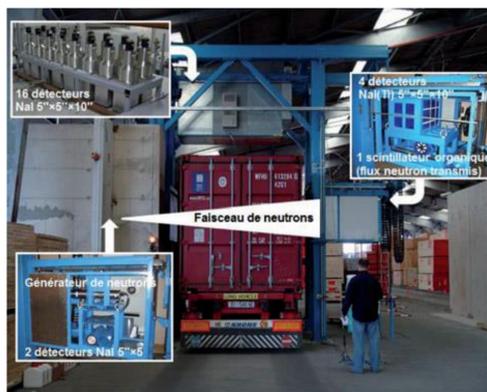


Figure 2 : Système d'inspection neutronique EURITRACK installé sur le port de Rijeka, en Croatie [3]

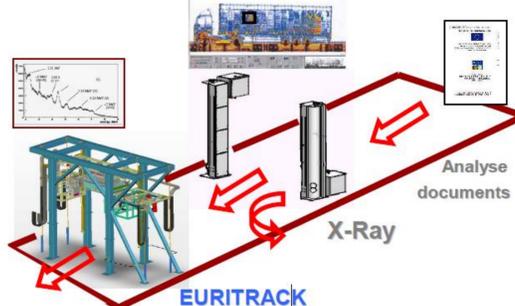


Figure 3 : Chaîne d'analyse de risques complétée par le système EURITRACK [3]

### Avantages :

- Réduire le temps d'inspection (10 à 15 min) ;
- réduire considérablement le niveau d'émission neutronique requis par rapport à un scanning entier du conteneur ;
- minimisation de la dose délivrée aux marchandises transportées,
- grand pouvoir de pénétration des neutrons rapides ;
- minimisation de la dose délivrée aux marchandises transportées,

### Inconvénients :

- Système lourd et difficile à déplacer ;
- la radioprotection est assurée par des murs en béton comparée à d'autres prototypes ;
- des problèmes lors de l'inspection des parties inférieures des conteneurs ;
- atténuation des photons et de la modulation neutronique lors de l'inspection.

## III Résultats

Afin de vérifier la performance du système EURITRACK, plusieurs essais ont été réalisés sur le site de démonstration au port de Rijeka en Croatie. Les résultats ci-dessous présentent un essai sur un fût de 100L rempli avec 75 kg de poudre d'acétate d'ammonium ( $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$ ) (pour simuler TNT  $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ ) puis placé au sein d'une matrice métallique dans un conteneur de test.

- Le volume simulé de TNT a été repéré à plus de 1500mm de la source neutronique (Fig. 4 et 5) ce qui est en accord avec les attentes.
- Le spectre d'énergie obtenu a permis d'identifier les principaux éléments constituant l'acétate d'ammonium (C, O, N).

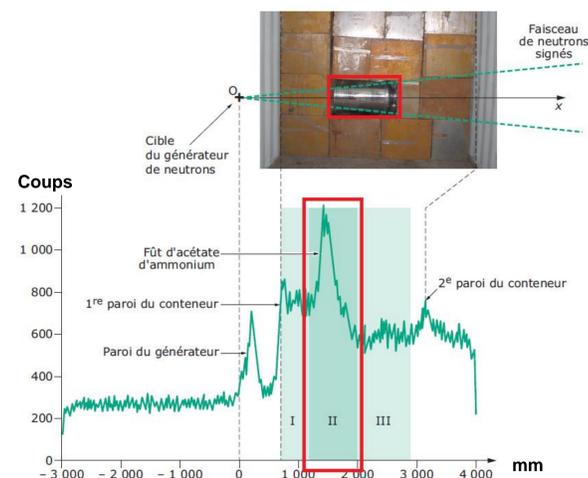


Figure 4 : spectre illustrant la distance parcourue avant d'interagir avec la cible [4]

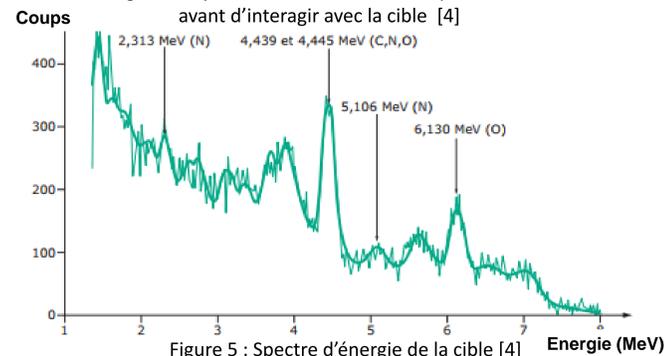


Figure 5 : Spectre d'énergie de la cible [4]

Le résultat du test ci-dessous (Fig. 6) présente un résultat de test de simulation avec le code MCNP sur un colis de déchets. Le colis est cimenté avec des dalles de mortier. La simulation d'une inspection en profondeur à l'intérieur d'un colis confiné entre deux couche de béton a permis d'identifier le graphite.

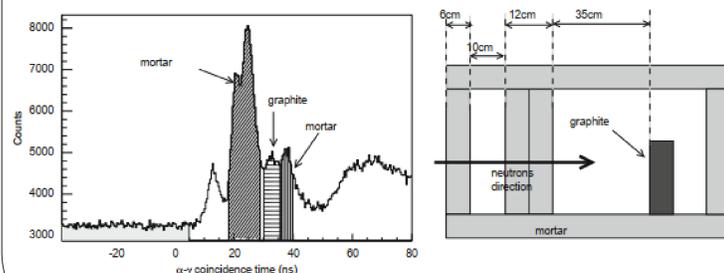


Figure 6 : Test de simulation d'un colis de déchets avec le code MCNP [5]

## Conclusion

- La caractérisation par interrogation neutronique est une technique complémentaire au scanner à rayons X, qui permet d'identifier la nature de la matière inspectée.
- Le projet EURITRACK est une application de la technique de la particule associée validé par l'expérience en particulier sur l'identification des explosifs.
- Le système d'inspection permet d'identifier les matières illicites. Néanmoins, il présente des inconvénients par rapports aux structures (murs en béton, systèmes lourds ...).
- La technique de la particule associée a montrée certaines faiblesse par rapport au objets hydrogénés.
- Les tests de simulation sur un colis de déchets ont montrés que la technique de la particule avancée permet d'identifier des matériaux à travers un mortier épais.
- Plusieurs éléments sont en cours de développement, notamment la fréquence d'émission des neutrons, le respect du débit de dose réglementé pour les travailleurs (1 μSv/h sans protection) et les systèmes électroniques d'acquisition de données.

### Bibliographie :

- [1] A. Sardet, B. Pérot, C. Carasco, G. Sannì, S. Moretto, G. Nebbia, C. Fontana, M. Moszyński, P. Siczynski, K. Grodzicki, L. Swiderski, A. Iovene, C. Tintori., Design of the Rapidly Relocatable Tagged Neutron Inspection System of the C-BORD project (hal-02418122), 2020
- [2] W. EL KANAWATI. Caractérisation élémentaire par interrogation neutronique avec la technique de la particule associée. Thèse de doctorat . Université de Grenoble. 2011
- [3] B. PEROT, G. SANNIE. Détection neutronique de matières illicites avec la technique de la particule associée. Doc. Réf. 177 – Techniques de l'ingénieur. 2015
- [4] J.-L. SZABO, B. PEROT, G. SANNIE. EURITRACK : inspection neutronique pour la lutte contre le trafic illicite. Réf. IN82 V1 – Techniques de l'ingénieur. 2008
- [5] C. Carasco, B. Perot, A. Mariani, W. El Kanawati, V. Valkovic, D. Sudac, J. Obhodas. Material characterization in cemented radioactive waste with the associated. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 619 (2010) 432–435