

Vers une architecture électronique unifiée et zéro temps mort pour l'instrumentation nucléaire

Yoann Moline, Mathieu Thevenin, Gwenolé Corre, Michel Paindavoine

CEA, LIST, Laboratoire Capteurs et Architectures Électroniques
F-91191 Gif-sur-Yvette, France
yoann.moline@cea.fr, mathieu.thevenin@cea.fr, gwenole.corre@cea.fr

CNRS, Université de Bourgogne - Laboratoire d'Étude de l'Apprentissage et du Développement
21000 DIJON, France
paindav@u-bourgogne.fr

Résumé

Dans l'instrumentation nucléaire, et d'autres domaines tels que les applications de la physique des particules, l'analyse de signaux médicaux (Tomographie par Émission de Positons (TEP), Électro-EncéphaloGraphie (EEG)) ou la détection de signaux radar, le signal mesuré est composé d'impulsions dont la date d'arrivée est aléatoire, et dont l'amplitude et la durée sont non-déterministes. La grande variété d'applications nécessite de disposer d'une architecture flexible pouvant être aisément reprogrammée. De plus, l'exigence de mesures en temps réel impose de disposer d'une grande capacité de calcul et de bande passante pour la mise en forme et l'extraction des caractéristiques des impulsions. Enfin, ces architectures doivent être capables de passer à l'échelle pour supporter des applications nécessitant parfois un très grand nombre de voies de mesure. Cet article décrit l'approche utilisée pour définir les éléments architecturaux répondant à ces contraintes. Elle est basée sur l'étude de l'état de l'art du domaine de l'instrumentation nucléaire allant des caractéristiques des détecteurs jusqu'à une analyse applicative en passant par l'électronique de traitement numérique. Notre proposition architecturale s'appuie sur le partage de ressources et est basée sur la séparation des impulsions du reste du signal en entrée de chaîne. La capacité de passage à l'échelle du modèle est vérifiée par simulation dont les résultats sont présentés dans cet article.

Mots-clés : Architecture numérique de traitement des impulsions, Traitement numérique du signal, Instrumentation nucléaire

1. Introduction

Le domaine de l'instrumentation nucléaire couvre un large spectre d'applications [16] qui évoluent de façon permanente grâce à l'avancée des technologies du numérique et du traitement du signal [27]. Malgré des exigences communes, des chaînes de mesure dédiées sont généralement mises au point pour répondre aux problèmes spécifiques d'un marché de niche [3]; cette tâche est complexe et nécessite une expertise dans différents domaines tels que la physique, la

chimie, les statistiques, la micro-électronique, l'informatique, etc. L'instrumentation nucléaire se caractérise par l'analyse d'un signal spécifique constitué d'impulsions d'amplitudes et de durées aléatoires dont les occurrences sont issues d'un processus poissonnien homogène. On appelle taux de comptage le nombre d'impulsions observées par unité de temps. La probabilité qu'une impulsion arrive sur le détecteur avant la fin de la précédente augmente avec le taux de comptage. Ce phénomène est appelé empilement et peut biaiser les résultats de mesure. À très haut taux de comptage, le signal observé n'est plus constitué que d'empilements. L'observation de paramètres statistiques (comme la variance) permet d'en extraire les informations pertinentes [11]. Le mode de fonctionnement est alors dit « fluctuation » pour le différencier du mode dit « impulsion » à bas taux de comptage. La Figure 1 illustre ces deux modes de fonctionnement.

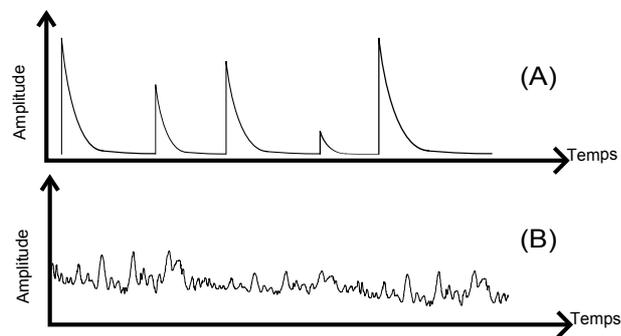


FIGURE 1 – Observation de signaux issus de détecteurs de l'instrumentation nucléaire : (A) le mode « impulsion » et (B) le mode « fluctuation ».

Chaque mode est exploité par des types d'applications distincts. Cependant, le mode « impulsion » se démarque par la richesse des applications, la diversité et la complexité des algorithmes associés [16, 27, 15], notamment pour la gestion des empilements [26]. Nous nous concentrons donc sur ce mode pour lequel nous distinguerons quatre grandes familles d'applications.

Comptage : Le comptage évalue le nombre d'événements sur une période de temps donnée. Il est par exemple utilisé pour déterminer l'activité d'une source radioactive.

Spectrométrie : La spectrométrie consiste en l'étude de la distribution des énergies déposées dans les détecteurs. L'identification des radio-éléments se fait grâce à leurs signatures énergétiques [16]. Cette technique est utilisée, par exemple, dans la caractérisation de colis de déchets ou l'identification de sources radioactives.

Discrimination : La discrimination consiste en la différenciation de la nature des impulsions qui sont obtenues à partir d'une interaction issue de rayonnements de types différents, comme par exemple les neutrons et les gammas ($n-\gamma$) [20]. Dans le cadre de la discrimination $n-\gamma$, ce type de mesure permet d'améliorer efficacement la détection et le comptage de neutrons.

Coïncidence temporelle : La coïncidence est une approche qui consiste à observer la simultanéité temporelle d'événements. Elle est par exemple utilisée pour différencier les émissions spontanées ou activées et est utilisée dans des techniques de neutrographie active ou d'imagerie médicale [12].

Une architecture de traitement du signal couvrant les applications du domaine de l'instrumentation nucléaire devrait être capable de répondre à trois problématiques. La première concerne la flexibilité applicative de l'architecture. L'ajout et l'agencement de nouvelles fonctionnalités doivent se faire de manière aisée notamment pour supporter la variété d'algorithmes associés aux applications du domaine mais aussi pour accélérer la mise en œuvre et le prototypage des mesures en laboratoire par des non-électroniciens. La deuxième concerne le passage à l'échelle de l'architecture. En effet, certains systèmes multiplient les voies de mesure jusqu'à dépasser la centaine de détecteurs [2]. L'architecture doit être en mesure de passer à l'échelle et de garantir son fonctionnement aussi bien pour une seule voie de mesure que pour traiter des données provenant de centaines de voies. La troisième concerne le temps mort. Les chaînes de mesures sont généralement paralysées après l'arrivée d'un événement. Durant toute la durée de cette paralysie, aucun nouvel événement ne peut être traité. Il s'agit du temps mort qui est une conséquence directe soit des processus physiques dans le détecteur, pour lesquels aucune solution électronique n'existe, soit des limitations de l'électronique de traitement du signal qui doit terminer ses calculs avant d'en accepter d'autres [16]. C'est sur ce dernier point qu'il est possible d'intervenir.

Des solutions doivent donc être trouvées pour pallier à ce besoin de flexibilité, de passage à l'échelle et de temps mort sans avoir à dimensionner une architecture au pire cas, qui se révélerait coûteux en termes de ressources de calcul.

Cet article présente dans un premier temps l'état de l'art des architectures électroniques utilisées pour tenter de répondre aux problématiques définies. Ensuite, les contraintes de conception sont extraites de l'étude des applications du domaine ainsi que des algorithmes qui y sont associés. Cette étude est corrélée avec les caractéristiques des détecteurs pour comprendre les limitations actuelles en termes de calcul temps réel du traitement du signal en instrumentation nucléaire. Un modèle d'architecture est proposé à partir de l'ensemble de ces éléments. Enfin, une estimation de sa capacité à supporter un grand nombre de voies est donnée au travers de simulations.

2. État de l'art

Les circuits analogiques sont traditionnellement utilisés pour répondre aux contraintes du temps réel. Ils sont petit à petit remplacés par des circuits numériques. Cette section présente l'état de l'art de la partie numérique des architectures du domaine par ordre chronologique.

Les travaux de [1] présentent une architecture dédiée à la spectrométrie qui propose d'associer un Processeur de traitement Numérique du Signal (DSP) avec une hiérarchie mémoire à deux niveaux. Le premier niveau mémorise le signal en sortie de Convertisseur Analogique-Numérique (CAN) puis transmet les données dans un second niveau mémoire lié au DSP. Le DSP repère directement les impulsions en mémoire grâce à leur position déterminée par un système de *trigg* analogique dédié. Le DSP dispose d'un composant d'Accès Direct à la Mémoire (DMA) qui permet de s'affranchir du non déterminisme de l'arrivée des impulsions tout en réduisant le temps mort du système. De plus, la flexibilité est apportée par le DSP qui est reprogrammable. Cette architecture a été améliorée [5] grâce à l'ajout de plusieurs tuiles de calcul contenant chacune le second niveau de mémorisation et un DSP. Si un nombre suffisant de tuiles de calcul est présent, le temps mort tend vers zéro. Néanmoins, cette approche n'est pas en mesure de gérer plusieurs voies de mesure ni de les corréliser entre elles. Des travaux plus récents [22, 23] présentent une architecture reconfigurable sur Field Programmable Gate Array (FPGA). Cette architecture est capable de réaliser une partie des mesures se trouvant dans le cycle de combustible du nucléaire comme le comptage neutronique et la spectrométrie. Une

voie de mesure est associée à une carte de traitement, avec la possibilité de travailler individuellement puis de corrélérer les résultats fournis par un ensemble de cartes. Cette architecture introduit la notion de macro-pipeline en séparant les étages de traitement, réduisant ainsi le temps mort à la latence de l'étage le plus lent. Cependant, le *firmware* doit être repensé et mis à jour en cas de modification du cadre applicatif. Cette modification peut être longue, complexe et coûteuse puisqu'elle nécessite des experts en traitement du signal et en VHDL/Verilog. Les utilisateurs finaux ne peuvent donc pas intervenir directement sur les traitements. Cette contrainte est allégée par la plate-forme proposée en [3] qui combine un dispositif de mesure et un ensemble de *firmware* prédéfinis permettant d'exécuter de nombreuses applications. Elle répond ainsi partiellement au besoin de flexibilité.

L'architecture de [24, 9] répond mieux au besoin de flexibilité applicative en offrant une plate-forme dotée d'un FPGA capable de réaliser du comptage, de la spectrométrie gamma, de la discrimination $n\text{-}\gamma$ et de la coïncidence. La carte dispose de 4 voies de mesure. À chaque voie est associée une tuile de calcul. Les traitements associés à chaque tuile sont implémentés indépendamment de manière à pouvoir travailler en parallèle sur le signal pour diminuer le temps mort. De plus, une interface avec un PC facilite la reconfiguration de certains éléments. L'architecture offre le choix entre deux types de *triggers* permettant de s'adapter à différents types de signaux. Si ces travaux se rapprochent le plus d'une plateforme multi-applicative, ils n'en restent pas moins dépendants du *firmware* du FPGA. De plus, seules 4 voies de mesure sont gérées, puisque les tuiles sont conçues pour être implémentées au sein d'un même FPGA, ce qui, d'une manière générale, limite le nombre de voies à la capacité du FPGA.

Les travaux de [17] séparent les impulsions du reste du signal en amont de tout autre traitement en se basant sur un fenêtrage temporel des impulsions. La taille des fenêtres, qui est reconfigurable, est prédéfinie pour une application donnée en fonction des caractéristiques des détecteurs. Grâce à cette méthode, la suite des traitements intégrés à la puce peut se concentrer uniquement sur les impulsions, diminuant ainsi drastiquement le temps mort. Ensuite, les impulsions sont distribuées sur deux étages de traitement fonctionnant en parallèle. Cependant, cette solution s'éloigne de la flexibilité proposée dans [9], de la réduction du temps mort apportée par [5] et n'est ni multivoies ni programmable.

Pris individuellement, les travaux présents dans la littérature ne permettent pas de répondre conjointement aux besoins de suppression du temps mort, de flexibilité ou de multivoies. Toutefois nous retiendrons l'intérêt de constituer un pipeline afin de limiter le temps mort, ainsi que la possibilité d'exploiter une hiérarchie mémoire associée à différents éléments de calcul. Les approches proposant de séparer les impulsions du reste du signal permettent d'exploiter au mieux la capacité de calcul. Enfin, aucune des approches proposées n'est suffisamment flexible, excepté dans [5] pour être en mesure de gérer une grande variété d'applications.

3. Analyse du contexte applicatif

Cette section présente les contraintes liées aux applications de traitement du signal dans le domaine de l'instrumentation nucléaire. Premièrement, les débits de données qu'il est possible d'atteindre en sortie des détecteurs sont détaillés. Ensuite, les algorithmes constitutifs des applications usuelles sont analysés. Les informations issues de cette analyse permettent de conclure sur des limites architecturales et d'introduire notre proposition afin de les dépasser.

3.1. Caractéristiques des détecteurs

Dans le domaine de l'instrumentation nucléaire, les différentes technologies de détecteurs sont utilisées en fonction de leurs coûts et des applications visées. les caractéristiques de résolu-

tions temporelle et en énergie dépendent de la technologie. Ces résolutions impliquent, lors de la conversion analogique-numérique du signal, une dynamique en bits et une fréquence d'échantillonnage respectivement corrélées aux résolutions énergétique et temporelle. Cela a un impact sur le débit de données à traiter comme le présente la Table 1. Dans la mesure où notre proposition doit être en mesure d'exploiter la plus grande gamme de détecteurs possible, nous considérerons le pire cas. Il s'agit des scintillateurs organiques qui imposent, par ligne de détection, une fréquence d'échantillonnage d'entrée de 5 GHz (pour un minimum de 10 échantillons par impulsion) et une résolution de 14 bits, soit un débit de 70 Gbits/s. Ce débit de numérisation peut sembler élevé mais il s'agit du pire cas, et la littérature actuelle nous permet d'être optimiste quant à l'évolution des performances des CANs [8].

Classe de détecteur	Résolution temporelle impulsion	Fréquence d'échantillonnage minimale	Résolution énergétique	Résolution du CAN	Taux de comptage	Bande passante approximative
Gaz	1 - 100 μ s	0,1 - 10 MHz	10 eV - 7 MeV \pm 2 - 50 keV	8 - 13 bits	10^3 - 10^5 i/s	80 - 130 Mbits/s
Semi-conducteur	8 - 10 ns	1 GHz	3 keV - 10 MeV \pm 100 - 300 eV	16 bits	10^7 i/s	16 Gbit/s
Scintillateurs organiques	2 - 10 ns	1 - 5 GHz	0 - 4 MeV \pm 1 - 40 keV	7 - 14 bits	10^7 - 10^8 i/s	7 - 70 Gbit/s
Scintillateurs inorganiques	0,3 - 1,1 μ s	100 - 300 MHz	0 - 4 MeV \pm 1 - 40 keV	7 - 14 bits	10^7 - 10^8 i/s	1 - 4 Gbit/s

Gaz : Chambre d'ionisation / Compteur proportionnel / Compteur Geiger-Müller [16, 14]

Semi-conducteurs : Germanium Ge [HP] / Silicium Si [16, 4, 18]

Scintillateurs organiques : Liquide Toluène-PPO / Plastique Polystyrène / Plastique Benzène [16, 20, 21]

Scintillateurs inorganiques : Na I (TI) / Cs I (TI) [16, 21]

TABLE 1 – Étude comparative des performances de différentes classes de détecteurs.

3.2. Présentation des algorithmes usuels de traitement des impulsions

La grande diversité des algorithmes de traitements des impulsions peut être classée en trois catégories. La première catégorie est la mise en forme du signal qui a pour but de le rendre exploitable par d'autres traitements. Il s'agit essentiellement de filtrage afin d'augmenter la précision de la mesure énergétique, de faciliter l'étage de *trigg*, ou de réduire notablement le nombre d'empilements en réduisant la largeur des impulsions. La deuxième, appelée *trigg*, a pour objectif de renseigner aux autres traitements les parties du signal dites « utiles », c'est à dire les impulsions, et des les dater. Le *trigger* à seuils et le discriminateur à fraction constante peuvent être cités. Enfin, la troisième catégorie concerne les algorithmes utilisés pour estimer la quantité d'énergie déposée dans le détecteur. Ils sont généralement réalisés par l'observation

de l'amplitude maximale d'une impulsion, de son aire ou de sa forme. Plusieurs algorithmes de chaque catégorie ont été décrits en langage Matlab et C afin d'être analysés et confrontés à des jeux de données réels. Cette analyse permet d'estimer l'ordre de grandeur des ressources nécessaires à l'exécution des algorithmes au travers une métrique simple, comme le nombre d'opérations par échantillon utiles à l'obtention du résultat comme le présente la Table 2. Cette analyse algorithmique permet de mettre en évidence la grande diversité d'algorithmes en terme de complexité.

		Op/ech			Op/ech
Mise en forme	DC block	6	Triggering datation	Discriminateur à fraction constante [10]	5
	Déconvolution à fenêtre glissante	(*1)		Comparateur à seuil	1
	Filtre trapézoïdal [13]	18		Trigger de Schmitt	4
	Filtre semi-gaussien	40 (*2)			
	Restaurateur ligne de base [9]	36			
	Filtre passe haut [13]	8	Estimation de l'énergie	Intégrale de la charge	2
	Filtre médian [28]	14 (*3)		Temps au-dessus du seuil	2
	Filtre à moyenne mobile exponentielle	6		Amplitude max	3
	Filtre à moyenne glissante	8		Charge totale/charge décalée [20]	8

TABLE 2 – Représentation de différents algorithmes du domaine en termes de nombre d'opérations par échantillon requis (la taille des fenêtres utilisées dans les algorithmes *1, *2 et *3 est adaptée pour des impulsions de 10 échantillons minimum).

3.3. Bilan

Une application typique de l'instrumentation nucléaire et constituée des algorithmes étudiés précédemment est considérée. Afin de ne pas paralyser le système lors du traitement des données, les implémentations usuelles sont réalisées en flot de données; l'intégralité du signal est alors traitée. Cela permet de corréler les chiffres de la Table 1 avec les résultats de l'étude algorithmique de la Table 2 comme présenté en Figure 2. Cet exemple illustre l'impossibilité d'utiliser des composants programmables sur étagère en raison de la capacité de calcul nécessaire qui atteint 290 Giga-Opérations par seconde (GOps) pour cet exemple relativement simple (sans filtre anti-bruit et utilisant un seuil simple). Ces chiffres permettent également d'expliquer l'absence, dans l'instrumentation nucléaire, d'algorithmes plus complexes comme le désempilement en ligne ou des analyses de forme plus poussées. La section suivante présente notre proposition de modèle d'architecture afin de résoudre ce problème tout en faisant abstraction des cibles matérielles pour son implémentation.

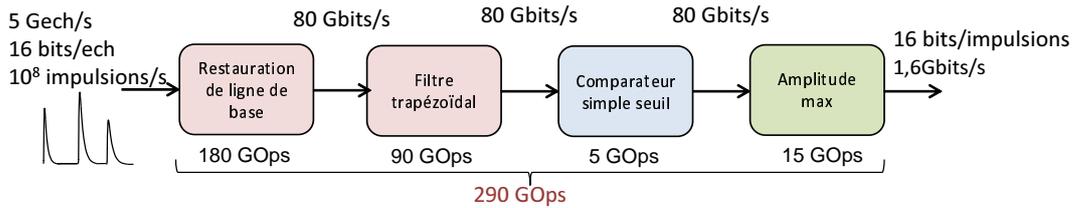


FIGURE 2 – Chaîne simple de spectrométrie confrontée au détecteur le plus exigeant en termes de bande passante.

4. Proposition d'un modèle d'architecture de traitement du signal dirigé par les impulsions

En reprenant la proposition [17] qui consiste à séparer les impulsions du flux de données afin de les traiter individuellement, il devient possible de réduire drastiquement le besoin en ressources de calcul comme l'illustre la Figure 3. Les ressources nécessaires, dans cet exemple de dix échantillons par impulsion, se limitent à quelques dizaines de GOps soit une décade de moins par rapport à la proposition en flot de données. Cependant, l'utilisation de composants programmables traditionnels reste limitée par l'important besoin en ressources de calcul.

Notre proposition architecturale repose donc sur le fait d'extraire du signal chaque nouvelle impulsion entrante puis de la transmettre directement à des éléments de calcul programmables. Le système n'est donc pas paralysé tant que le nombre d'unités de calcul est suffisant. La distribution des impulsions sur différentes unités de calcul peut être représentée par un chronogramme comme illustré par la Figure 4.

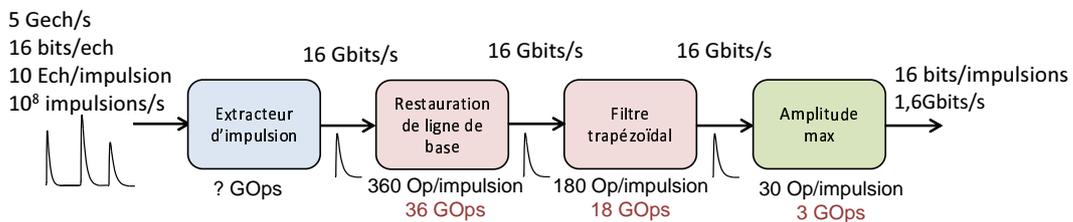


FIGURE 3 – Application de la séparation des impulsions en entrée de chaîne sur une chaîne simple de spectrométrie confrontée au détecteur le plus exigeant en terme de bande passante.

4.1. Séparation et distribution des impulsions

Les principes de séparation des impulsions du reste du signal en entrée de chaîne introduit dans [17] et de gestion du temps mort proposé dans [1] sont repris et développés. Comme la proposition repose sur la séparation des impulsions, il est nécessaire d'introduire un dispositif capable d'extraire les impulsions du reste du signal. Pour cela nous intégrons un étage programmable de *trigg*. Cette flexibilité rend plus aisée la gestion des problématiques traditionnelles de *triggering* comme le bruit et permet, en outre, de ne pas limiter notre architecture au mode « impulsion ». Enfin, elle permet d'implémenter des *triggers* complexes comme celui proposé en [19, 25] qui offre la possibilité de séparer et de mémoriser les impulsions en s'adaptant à leurs tailles. Ces impulsions sont ensuite transmises directement à un ensemble

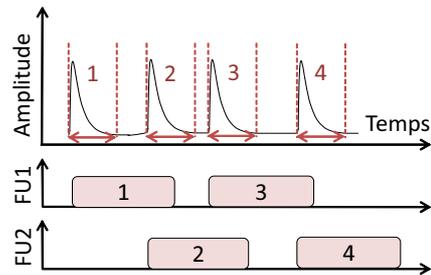


FIGURE 4 – Distribution des impulsions sur différentes ressources du calcul. Dans cet exemple, toutes les impulsions sont traitées.

de ressources de calcul représenté en Figure 5. Le choix de la ressource de calcul est réalisé par un ordonnanceur qui connaît les ressources de mémorisation et de calcul disponibles pouvant recevoir de nouvelles impulsions.

4.2. Ressources de calcul

Les ressources de calcul destinées à traiter les impulsions sont constituées de blocs programmables individuels (Unité fonctionnelle (FU)). Un bloc seul est une unité de calcul gros grain (*e.g.* processeur généraliste, DSP, etc.) au moins capable de supporter l'un des algorithmes décrits en section 3.2. L'association de ces différents blocs et des algorithmes y étant implémentés permet de constituer une chaîne de traitement des impulsions. L'impulsion devient le mot de donnée et doit donc parcourir un ensemble prédéfini de blocs. Grâce à ce découpage, les blocs sont naturellement pipelinés (macro-pipeline). Comme la donnée est de taille variable, la durée des traitements peut varier. C'est pourquoi, un modèle de communication asynchrone est utilisé entre les FUs, ce qui permet de propager les données dès que cela est possible, c'est à dire qu'une FU est disponible pour recevoir l'impulsion et la traiter. De plus, ajouter un bloc ou en changer le traitement n'oblige pas à modifier l'ensemble de la chaîne, répondant ainsi au besoin de flexibilité. Ce type de modèle se rapproche du GALS [7] et peut être défini comme « dirigé par les impulsions ».

4.3. Support multivoies

L'augmentation du nombre de voies implique que plusieurs extracteurs d'impulsions doivent distribuer leurs impulsions. Il y a donc plus d'impulsions à traiter, entraînant une augmentation du nombre de FUs nécessaires. Puisque chaque voie reçoit des événements aléatoires de manière indépendante, les extracteurs d'impulsions qui leur sont associés n'ont pas nécessairement besoin d'accéder à des ressources de calcul au même moment pour distribuer leurs impulsions. La Figure 6 illustre l'intérêt du partage des ressources de calcul entre les voies. Notre modèle multivoies peut alors bénéficier de l'utilisation de ressources partagées pour passer à l'échelle. Il ne sera alors pas forcément nécessaire d'augmenter la quantité de ressources partagées proportionnellement au nombre de voies de mesure. La validation expérimentale du passage à l'échelle de notre modèle est présentée dans la section suivante.

4.4. Validation du passage à l'échelle du modèle dirigé par impulsions à ressources de calcul partagées

Une approche comparable à [6] est développée afin de corrélérer le nombre de ressources de calcul au temps mort du système. Toutefois, ici, nous ne cherchons pas à dimensionner une architecture pour une application spécifique. Nous souhaitons observer l'augmentation du nombre

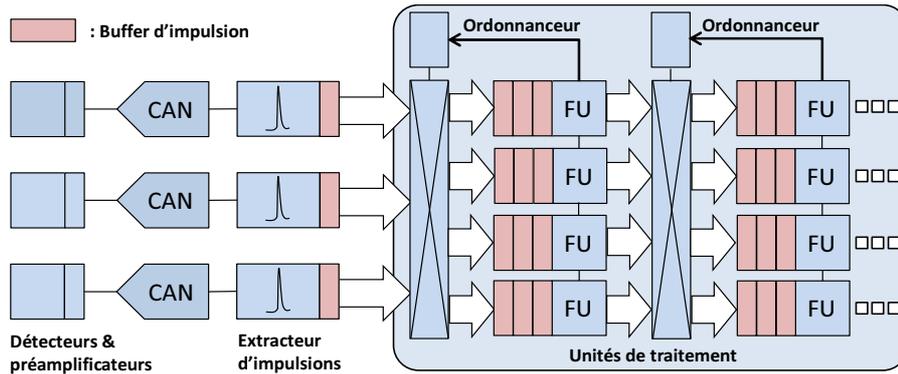


FIGURE 5 – Modèle d'architecture proposé pour répondre aux contraintes du domaine de l'instrumentation nucléaire.

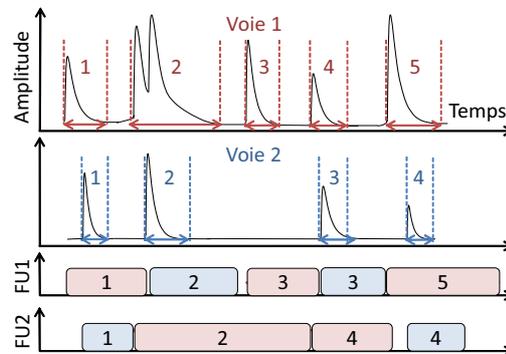


FIGURE 6 – Affectation du traitement des impulsions sur une architecture multivoies à ressources partagées.

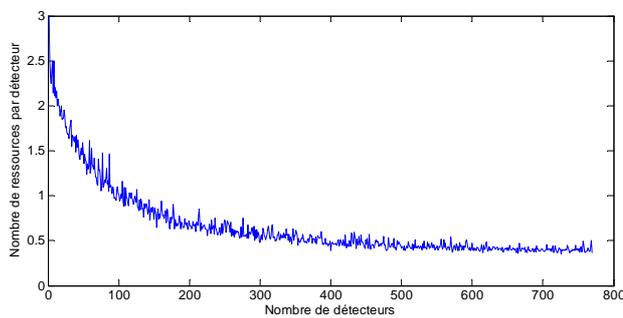
de FUs nécessaire par détecteur en fonction, d'une part, de l'augmentation du nombre de voies et d'autre part, du débit des impulsions, tout en respectant la contrainte d'un système zéro temps mort.

Pour cette étude, les hypothèses suivantes ont été considérées :

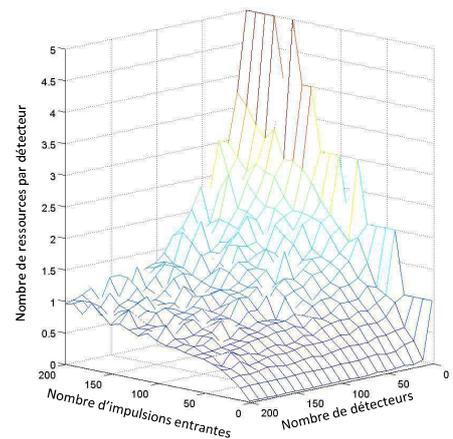
- le temps d'accès aux ressources ne croît pas avec l'augmentation de leur nombre grâce à l'utilisation d'un commutateur parfait (*e.g. crossbar*) ;
- le temps alloué au transfert d'une impulsion ne dépend pas de sa taille ;
- l'ordonnancement se fait en temps constant au travers d'une liste qui permet de connaître les ressources disponibles ;
- le traitement d'une FU est déterministe (*e.g. filtre*) et ne dépend donc que de la taille de l'impulsion ;
- le temps d'une FU pour signaler un changement d'état est constant ;
- le débit d'impulsions simulé respecte le mode « impulsion » (empilements limités) ;
- la probabilité qu'un détecteur interagisse avec un rayonnement est la même pour tous les détecteurs comme dans [2].

Les simulations ont été réalisées sous Matlab. Les Figures 7a et 7b présentent les résultats avec un débit d'impulsions par voie de mesure fixe dans la Figure 7a et variable dans la Figure 7b.

Comme le montre la Figure 7a, le besoin en nombre de ressources de calcul total ramené au nombre de détecteurs ne croit pas de manière proportionnelle au nombre de détecteurs. La courbe s'apparente à une exponentielle décroissante. Le bruit est dû au non-déterminisme de l'arrivée et de la taille des impulsions. La Figure 7b confirme cette tendance quel que soit le débit d'impulsions. En effet, si le débit ne dépasse pas les limites du mode « impulsion », il influence uniquement la limite basse du nombre de ressources par détecteur en suivant une tendance qui s'apparente à une croissance logarithmique, confirmant ainsi que le nombre de ressources n'explosera pas. Cette étude permet de confirmer la pertinence de l'utilisation d'une architecture à ressources partagées pour les systèmes d'instrumentation nucléaire multivoies.



(a)



(b)

FIGURE 7 – Évolution du nombre de ressources nécessaires au zéro temps mort par détecteur fonction du nombre de détecteurs : (a) pour un nombre d'événements donnée, (b) en fonction du nombre d'événements à traiter sur une période donnée.

5. Conclusion et perspectives

Les travaux préliminaires permettant la conception d'une architecture unifiée pour le domaine de l'instrumentation nucléaire étant apte à répondre aux problématiques de flexibilité, de temps mort et de passage à l'échelle sont présentés dans cet article. Un état de l'art des applications et plateformes a permis d'extraire les avantages et inconvénients des architectures numérique du domaine. L'analyse des applications et algorithmes associés au traitement numérique des impulsions nous a permis d'identifier les contraintes de dimensionnement des architectures en flot de données puis dirigées par les impulsions. Un modèle d'architecture innovant car dirigée par les impulsions est proposée. Ce modèle offre une solution à la problématique de temps mort et au contexte multi-applicatif en séparant des impulsions du reste du signal. Les impulsions sont extraites puis distribuées en fonction de la disponibilité des ressources au sein d'unités de calcul programmables partagées. Ces unités de calcul fonctionnent de manière autonome ce qui leur permet de s'adapter à la variabilité des données et des traitements. En s'affranchissant du non-déterminisme du signal, cette nouvelle approche permet désormais d'envisager l'utilisation, pour le domaine de l'instrumentation nucléaire, de solutions couramment utilisées

dans d'autres domaines tel que les modèles multiprocesseurs ou la conception asynchrone. Les prochains travaux se focaliseront sur le modèle d'exécution. Ils définiront le réseau d'interconnexion, l'accès aux ressources, une politique d'ordonnancement basée sur la variabilité de la taille des impulsions et la gestion de la concurrence entre les voies. Ils seront suivis du dimensionnement des FUs et de la réalisation effective de l'architecture dans le cadre d'applications complètes.

Remerciements

Le Laboratoire National Henri Becquerel est remercié pour les informations fournies sur les détecteurs ainsi que Thomas Peyret, dont le soutien fut nécessaire à la rédaction de cet article.

Bibliographie

1. Basilio Simoes (J.) et Correia (C. M.). – Pulse Processing Architectures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 422, n1-3, février 1999, pp. 405–410.
2. Bazzacco (D.). – The Advanced Gamma Ray Tracking Array AGATA. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 746, décembre 2004, pp. 248–254.
3. CAEN. – WP2081 Digital Pulse Processing in Nuclear Physics, 2011.
4. Canberra. – High-purity Germanium (HPGe) Detectors, 2012.
5. Cardoso (J. M.), Basilio Simoes (J.) et Correia (C. M.). – A High Performance Reconfigurable Hardware Platform for Digital Pulse Processing. *Nuclear Science, IEEE transactions on*, vol. 51, n3, 2004, pp. 921–925.
6. Cardoso (J. M.), Basilio Simoes (J.) et Correia (C. M.). – Dead-time Analysis of Digital Spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 522, n3, avril 2004, pp. 487–494.
7. Chapiro (D.). – *Globally-asynchronous Locally-synchronous Systems*. – Thèse de PhD, Stanford University, 1984.
8. Chen (C.-Y.), Wu (J.), Hung (J.) et Li (T.). – A 12-Bit 3 GS/s Pipeline ADC With 0.4 mm and 500 mW in 40 nm Digital CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, n4, 2012, pp. 1013–1021.
9. Faisal (M.), Schiffer (R.), Haling (M. J.), Flaska (M.), Pozzi (S. a.) et Wentzloff (D. D.). – A Data Processing System for Real-Time Pulse Processing and Timing Enhancement for Nuclear Particle Detection Systems. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 60, n2, avril 2013, pp. 619–623.
10. Fallu-Labruyere (A.), Tan (H.), Hennig (W.) et Warburton (W.). – Time Resolution Studies Using Digital Constant Fraction Discrimination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 579, n 1, août 2007, pp. 247–251.
11. Geslot (B.) et Unruh (T.). – Method to Calibrate Fission Chambers in Campbell Mode. – In *International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, 2011.
12. Haselman (M.), Miyaoka (R.), Lewellen (T.) et Hauck (S.). – FPGA-Based Data Acquisition System For a Positron Emission Tomography (PET) Scanner. – In *Proceedings of the International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, (FPGA 2008)*, pp. 264–264, 2008.
13. Jordanov (V. T.). – Exponential Signal Synthesis in Digital Pulse Processing. *Nuclear Ins-*

- truments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 670, avril 2012, pp. 18–24.
14. Julin (J.). – *Development of a High Energy Resolution Gas Ionization Detector for a Recoil Spectrometer*. – Thèse de PhD, University of Jyväskylä, 2011.
 15. Kamleitner (J.), Coda (S.), Gnesin (S.) et Marmillod (P.). – Comparative Analysis of Digital Pulse Processing Methods at High Count Rates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 736, février 2014, pp. 88–98.
 16. Knoll (G. F.). – *Radiation Detection and Measurement*. – Wiley, John & Sons, 2010, 4th édition.
 17. Lee (P.), Lee (C.) et Lee (J.). – Development of FPGA-based Digital Signal Processing System for Radiation Spectroscopy. *Radiation Measurements*, vol. 48, 2012, pp. 12–17.
 18. Mihailescu (L.), Borcea (C.) et Plompen (A.). – Data Acquisition With a Fast Digitizer for Large Volume HPGe Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 578, n1, juillet 2007, pp. 298–305.
 19. Moline (Y.), Thevenin (M.), Corre (G.) et Peyret (T.). – Procédé et système d'extraction dynamique d'impulsions dans un signal temporel bruité. *Brevet numéro FR14 50568*, 2014.
 20. Moszynski (M.), Bizard (G.) et Costa (G.). – Study of n- γ Discrimination by Digital Charge Comparison Method for a Large Volume Liquid Scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 317, n1–2, 1992, pp. 262–272.
 21. Moszynski (M.), Nassalski (A.), Syntfeld-Kazuch (A.), Swiderski (L.) et Szczecniak (T.). – Energy Resolution of Scintillation Detectors—New Observations. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 55, n3, juin 2008, pp. 1062–1068.
 22. Normand (S.), Kondrasov (V.), Corre (G.) et Passard (C.). – PING : A New Approach For Nuclear Fuel Cycle Instrumentation. *1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, juin 2009, pp. 1–4.
 23. Normand (S.), Kondrasovs (V.), Corre (G.), Boudergui (K.), Blanc de Lanaute (N.), Bourbotte (J.-M.), Woo (R.), Pin (P.) et Tondut (L.). – PING for Nuclear Measurements : First Results. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 59, n4, août 2012, pp. 1232–1236.
 24. Schiffer (R. T.), Flaska (M.), Pozzi (S. a.), Carney (S.) et Wentzloff (D. D.). – A Scalable FPGA-based Digitizing Platform for Radiation Data Acquisition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 652, n1, octobre 2011, pp. 491–493.
 25. Thevenin (M.) et Corre (G.). – Method for Acquiring and Processing Signals. *Brevet numéro WO2013135695*, 2013.
 26. Trigano (T.) et Dautremer (T.). – Pile-up Correction Algorithms for Nuclear Spectrometry. – In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on*, pp. 441–444, 2005.
 27. Warburton (W.), Momayezi (M.), Hubbard-Nelson (B.) et Skulski (W.). – Digital Pulse Processing : New Possibilities in Nuclear Spectroscopy. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, vol. 53, n4-5, octobre 2000, pp. 913–20.
 28. Yin (L.), Yang (R.) et Gabbouj (M.). – Weighted Median Filters : A Tutorial. *Circuits and Systems II : Analog and Digital Signal Processing, IEEE transactions on*, vol. 43, n3, 1996, pp. 157–192.