

# Modèle de consommation d'énergie des liens sensible au crosstalk pour les réseaux sur puces

Erwan Moréac, Johann Laurent, André Rossi, Pierre Bomel

► **To cite this version:**

Erwan Moréac, Johann Laurent, André Rossi, Pierre Bomel. Modèle de consommation d'énergie des liens sensible au crosstalk pour les réseaux sur puces. COMPAS, Jul 2016, Lorient, France. <<https://compas2016.sciencesconf.org/>>. <hal-01449409>

**HAL Id: hal-01449409**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01449409>**

Submitted on 30 Jan 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

# Modèle de consommation d'énergie des liens sensible au crosstalk pour les réseaux sur puces

Erwan Moréac<sup>1</sup>, Johann Laurent<sup>1</sup>, André Rossi<sup>2</sup>, et Pierre Bomel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Bretagne-Sud, Lab-STICC, CNRS UMR 6285, F-56100 Lorient, France, prenom.nom@univ-ubs.fr

<sup>2</sup>Univ. Angers, LERIA, Angers, France, andre.rossi@univ-angers.fr

---

## Résumé

Les réseaux sur puces (NoCs) sont reconnus comme étant la solution pour régler le problème de transfert de données dans les systèmes sur puces multiprocesseurs (MPSoCs). Étant donné qu'un NoC représente une part significative de la consommation d'énergie d'un système, les concepteurs de circuits désirent des modèles de consommation d'énergie précis de ces réseaux dans le but de produire des systèmes basse consommation. Aujourd'hui, les simulateurs de NoC s'appuient sur des modèles de consommation d'énergie dont le modèle de liens ne prend pas en compte le crosstalk. Dans cet article, nous présentons un modèle de consommation d'énergie de liens avec la modélisation du crosstalk intégrée dans un simulateur de NoC. Nous montrons que le crosstalk a un impact important sur la consommation d'énergie totale du réseau et que ne pas prendre en compte ce phénomène génère jusqu'à 45,5% d'erreur d'estimation sur la consommation totale d'énergie du réseau.

**Mots-clés :** réseau sur puce (NoC), interconnexions, crosstalk, consommation d'énergie

---

## 1. Introduction

Les progrès technologiques qui ont permis de miniaturiser les transistors ont rendu possible le déploiement d'applications de plus en plus complexes pour les systèmes embarqués. Cette hausse de la complexité des applications a également augmenté les besoins en bande passante, auxquels les NoCs apportent une réponse. Cependant, dans le processeur RAW [13] la consommation d'énergie du NoC représente 40% de la consommation du système. Cet impact énergétique force à considérer l'énergie consommée par le NoC comme une contrainte majeure pour les concepteurs de systèmes embarqués. Les principaux composants d'un NoC sont les liens (ou interconnexions), les routeurs et les interfaces réseaux (NIs). A chaque nœud technologique, tous les composants n'évoluent pas de la même manière. En effet, la consommation d'énergie et le délai des liens augmentent tandis que la consommation et le temps de commutation des transistors diminuent [1]. C'est pourquoi, plus les technologies de fabrication deviennent fines, plus la consommation d'énergie des liens devrait être considérée avec attention dans la consommation du NoC.

Les simulateurs de NoCs sont actuellement utilisés pour aider les concepteurs dans les premières étapes du design. Ces outils émulent le comportement du réseau sous différents trafics et ils rassemblent de nombreux résultats durant la simulation comme le délai moyen, la consommation totale d'énergie, etc. Les simulateurs capables d'estimer la consommation d'énergie tels que [7, 2], reposent sur des modèles relativement simples pour l'estimation de la puissance des liens. En effet, ces simulateurs utilisent principalement des modèles de puissance tels qu'ORION 2.0 [9] pour faire une estimation de la consommation d'énergie du NoC dont le modèle des liens est basé sur un taux d'activité et une capacité fixe.

Dans cet article, nous proposons un modèle de consommation d'énergie pour les liens qui améliore la précision d'estimation de consommation de tout le NoC. Ce modèle est dépendant des données afin de prendre en compte le crosstalk, un phénomène physique décrit à la section III. Ce modèle de puissance rend nécessaire l'accès aux bits constituant les flits, ce qui nous a conduit à modifier Noxim [7], un simulateur de NoC pour le rendre précis au bit-près. Nous montrons ensuite que les modèles de liens ne prenant pas en compte le crosstalk ne peuvent pas estimer de manière précise la consommation

d'énergie des liens. De cette manière, nous concluons que les simulateurs de NoC traditionnels équipés de ce type de modèle produisent des erreurs d'estimation de la consommation d'énergie allant jusqu'à 45,5%.

Le reste de cet article est organisé comme suit. Dans la section II, nous présentons brièvement l'état de l'art : les modèles de puissance dans les simulateurs de NoCs. La section III présente un modèle de puissance des liens qui tient compte du crosstalk. Ensuite, la section IV représente l'intégration de ce modèle dans le simulateur et fait la comparaison des deux types de modèles. La dernière section conclut cet article.

## 2. État de l'art

Dans un simulateur de NoC, l'approche pour estimer la puissance du NoC est une approche "descendante" : le système est progressivement décomposé en sous-ensembles pour déterminer la puissance de chacun des composants afin de connaître la puissance totale. Néanmoins, les modèles de puissance des NoC utilisés dans les simulateurs sont de différentes granularités. Le premier niveau de granularité correspond aux modèles au niveau architectural tel que ORION 2.0 [9] ou DSENT [12]. En effet, ils connaissent l'architecture et le nombre de transistors par composant. Ainsi, ils peuvent estimer la consommation d'énergie d'un composant avec le nombre de transistors et avec des équations paramétriques basées sur les paramètres technologiques. Ensuite, ils utilisent ces modèles en tant que blocs élémentaires pour en construire des modèles plus grands. Les coûts en énergie de toutes les opérations d'un routeur sont ensuite déterminés. De plus, ces modèles de consommation d'énergie du NoC ont un modèle de liens inter-routeur donné par les 2 équations suivantes de DSENT [12] :

$$P_{link} = \alpha \cdot C_{\ell} \cdot V_{dd}^2 \cdot f_{clk} \quad (1)$$

$$C_{\ell} = C_{in} + C_{gnd} + C_{cc} \quad (2)$$

Dans (1),  $P_{link}$  représente la consommation dynamique des liens, qui est calculée avec  $\alpha$  le taux de commutation,  $C_{\ell}$  la capacité du lien,  $V_{dd}$  la tension d'alimentation et la fréquence de l'horloge  $f_{clk}$ .  $C_{\ell}$  dans (1) est la somme de la capacité d'entrée du prochain répéteur  $C_{in}$ ,  $C_{gnd}$  la capacité de la masse et du couplage capacitif  $C_{cc}$ . Dans (1),  $\alpha$  est une valeur globale qui représente le taux de commutation des flits pendant toute la simulation. Par ailleurs, la constante de 0,5 est choisie pour  $\alpha$  comme la valeur moyenne comprise dans l'intervalle [0, 1], car ce modèle est insensible aux données réelles des flits et ne peut donc connaître le véritable taux de commutation pendant la simulation. En effet, dans le programme de DSENT, une constante égale à 0,5 est utilisée à la place de  $\alpha$ . La capacité des liens  $C_{\ell}$  est calculée par la somme de  $C_{in}$ ,  $C_{gnd}$  et  $C_{cc}$ . En outre, la capacité de couplage  $C_{cc}$  est égale à une constante ce qui implique que la consommation d'énergie des liens est considérée comme une constante, indépendamment des données qui transitent sur les liens.

Le deuxième type de granularité de modèle de consommation du réseau est basé sur des descriptions de circuits HDL avec des simulateurs matériels. Ici, l'estimation de la consommation d'énergie est basée sur des composants simulés alors que dans les modèles de consommation architecturaux, l'énergie est calculée avec une estimation du nombre de transistors. Le modèle de Noxim [7] et de [11] appartiennent à cette deuxième catégorie. Ce type de modèle suit les étapes classique de conception. De ce fait, l'estimation faite par les outils de CAO est utilisée pour produire le modèle de chaque composant du réseau. Cependant, la modélisation de la puissance des interconnexions inter-routeur est réalisée comme précédemment. Ainsi, ces modèles d'interconnexions sont nommés data-indépendants. Dans cet article, nous proposons un modèle de consommation d'énergie des liens qui est data-dépendant pour être en mesure d'examiner l'effet du crosstalk, phénomène décrit en détail dans la section suivante.

## 3. Modélisation de l'énergie des liens

### 3.1. Approche "ascendante"

Contrairement aux modèles de consommation d'énergie précités, notre étude se base sur le modèle d'interconnexion de [4]. Ce modèle de puissance est basé sur une approche "ascendante". Ce modèle de puissance est conçu par l'assemblage des composants électroniques les plus élémentaires tels que

TABLE 1 – Capacité effective  $C_{eff}$  et facteur de délai  $g$  du fil victime selon les transitions

$C_{eff}$	Types de transitions				$g$
$C_s$	(↓, ↓, ↓)	(↑, ↑, ↑)			1
$C_s + C_c$	(-, ↓, ↓)	(↓, ↓, -)	(-, ↑, ↑)	(↑, ↑, -)	$1 + r$
$C_s + 2C_c$	(-, ↓, -)	(-, ↑, -)	(↓, ↑, ↑)	(↑, ↓, ↓)	$1 + 2r$
$C_s + 3C_c$	(-, ↑, ↓)	(↓, ↑, -)	(-, ↓, ↑)	(↑, ↓, -)	$1 + 3r$
$C_s + 4C_c$	(↓, ↑, ↓)	(↑, ↓, ↑)			$1 + 4r$

TABLE 2 – Classification énergétique des transitions de la table 1

Type de transition	$C_{eff}$					Consommation d'énergie
Transitions montantes	$C_s$	$C_s + C_c$	$C_s + 2C_c$	$C_s + 3C_c$	$C_s + 4C_c$	13,83 fJ
Transitions descendantes	$C_s$					33,77 fJ
		$C_s + C_c$				92,00 fJ
			$C_s + 2C_c$			150,54 fJ
				$C_s + 3C_c$		207,76 fJ
					$C_s + 4C_c$	265,07 fJ

des résistances et des condensateurs pour constituer le composant ciblé. En effet, la latence des liens et la consommation d'énergie peuvent être modélisées par une résistance et un condensateur. Ce modèle est basé sur une caractérisation en utilisant un simulateur SPICE. SPICE est utilisé dans l'industrie pour faire des simulations électriques afin de valider le fonctionnement d'un circuit intégré avant de l'envoyer en fabrication. Dans le domaine de la recherche, DSENT a utilisé SPICE pour valider son modèle de consommation d'énergie et déterminer sa précision [12]. Ainsi, proposer un modèle d'interconnexions basé sur des résultats provenant de SPICE nous assure le plus haut degré de précision possible, puisque relever des mesures sur un ASIC demanderait un investissement temporel et financier prohibitif.

### 3.2. Modèle de consommation d'énergie des liens

Ce modèle de liens est basé sur un modèle résistance-condensateur (modèle RC). L'une des conditions obligatoires pour que l'inductance soit significative dans les interconnexions est que les liens subissent des pics de variations de tension ou de courant fort [5]. Comme cette condition n'est pas rencontrée dans les liens de communication du NoC, l'inductance n'est pas prise en compte. Dans un premier temps, pour être aussi proche que possible du comportement du fil : 1) le modèle RC Π3 est utilisé et il apporte une erreur d'estimation de la consommation d'énergie et de la latence inférieure à 5% [10] et 2) il y a au moins deux répéteurs dans chaque interconnexion pour permettre la transmission du signal. Lorsque les transitions se produisent dans les interconnexions adjacentes, des perturbations apparaissent en raison de la capacité de couplage  $C_c$ , ce phénomène est appelé crosstalk (ou diaphonie capacitive). Sur un bus de communication, un fil victime aura 2 agresseurs parce que la capacité de couplage au-delà des deux plus proches voisins est négligeable.

Les fils du modèle RC Π3 avec la capacité de couplage  $C_c$  entre eux sont utilisés pour les simulations électriques avec ELDO v5.7, un outil de SPICE. Les paramètres physiques d'entrées sont la technologie, la couche de métal et la longueur du câble. Le choix de bufferization totale ou non est également disponible et différents types de données peuvent être transportées sur les lignes lors de simulations. Tous les résultats sont résumés dans des tables et ces tables sont utilisées pour estimer avec précision la consommation d'énergie et le délai selon les paramètres physiques et les bits de données à travers les liens. Les effets du crosstalk sur la latence et l'énergie sont décrits dans les paragraphes suivants.

### 3.3. Impact du crosstalk sur les liens

Les effets du crosstalk deviennent de plus en plus importants avec la miniaturisation technologique. En effet, les performances des interconnexions se dégradent avec chaque nouveau nœud de technologie [1] parce que les liens deviennent de plus en plus minces et proches, donc le couplage capacitif et la résistance du fil augmentent. Voyons les effets du crosstalk sur la latence et la consommation d'énergie des liens. Tout d'abord, le crosstalk augmente le temps de transmission du signal en fonction des transitions de données subies par les fils et leurs voisins. La table 1 tirée de [4] montre la classification des différentes transitions selon le temps de propagation sur le fil victime. Le paramètre  $g$  représente le facteur de retard,  $r$  le rapport entre de la capacité induite par le crosstalk  $C_c$  et la capacité de fil au substrat  $C_s$ . Trois symboles sont utilisés pour identifier les transitions sur un lien : ↓ est une transition descendante, ↑ en représente une montante et un - est une absence de transition. Cette classification démontre que le crosstalk a un impact sur le délai qui peut fortement varier en fonction des transitions observées.

En second lieu, le crosstalk augmente la consommation d'énergie des interconnexions. En fait, la consommation dynamique des liens est donnée par :

$$P_{dyn} = \sum_{i \in N_{wires}} \alpha_i \cdot C_{eff_i} \cdot V_{dd}^2 \cdot f_{clk} \quad (3)$$

Dans (3),  $P_{dyn}$  est la consommation dynamique des liens avec  $N_{wires}$  le nombre de fils,  $\alpha_i$  : le taux d'activité du fil  $i$ ,  $C_{eff_i}$  : capacité du fil  $i$  selon la table 1,  $V_{dd}$  et  $f_{clk}$  sont les mêmes que dans (1). Avec (3), il est clair que la consommation d'énergie dynamique dépend linéairement de la capacité du fil. En outre, la différence entre (1) et (3) est que, dans (3),  $C_{eff_i}$  change en fonction de  $\alpha_i$  et l'impact du crosstalk sur chacune des transitions est pris en compte. Ainsi, (3) nous montre que le taux d'activité  $\alpha_i$  change en fonction des données réellement envoyées à travers les liens, ce qui est une caractéristique unique qui distingue clairement ce modèle des modèles des liens data-indépendants.

La table 2, dérivée de [4], est la classification énergétique des transitions. La simulation a été effectuée avec les paramètres suivants : technologie 65 nm , longueur de fil 1 mm et sur une couche métallique intermédiaire, sachant que cette classification est la même dans toutes les configurations. Les motifs des transitions peuvent être divisés en deux types, les transitions montantes ( $?, \uparrow, ?$ ), les transitions descendantes ( $?, \downarrow, ?$ ) où  $?$  représente  $\uparrow, \downarrow$  ou  $-$ . Si l'on compare le pire cas de transition descendante ( $\uparrow, \downarrow, \uparrow$ ) qui consomme 265,07 fJ avec le coût moyen des transitions montantes ( $?, \uparrow, ?$ ) qui consomme 13,83 fJ, les transitions montantes sont près de vingt fois inférieures à la pire transition descendante. De plus, pour un même nombre de transitions on constate que la consommation peut être très différente, donc pour un même  $\alpha$  l'énergie peut varier. En d'autres termes, ne pas considérer l'effet du crosstalk par l'utilisation d'un modèle data-indépendant peut conduire à d'importantes erreurs d'estimation de l'énergie.

#### 4. Comparaison des modèles de consommation d'énergie

Cette section vise à répondre à deux questions. Tout d'abord, quelle est la précision des modèles de consommation d'énergie des liens data-indépendant basés sur l'équation (1)? Deuxièmement, quelle est la part de la consommation d'énergie des interconnexions dans la consommation du NoC? Pour répondre à ces questions, la première étape consiste à intégrer le modèle de liens proposé dans un simulateur de NoC, pour ce faire nous modifions un simulateur de NoC afin de rendre le bit-près.

##### 4.1. L'insertion du modèles d'interconnexion

Le simulateur Noxim [7] a été sélectionné pour embarquer le modèle de consommation d'énergie pour les liens. Afin d'utiliser le modèle d'interconnexion qui est data-dépendant, il est obligatoire de connaître les bits de données des flits pour déterminer les types de transitions, et donc Noxim doit devenir bit-près. Ainsi, le contenu des flits a été ajouté et dans chaque routeur, une analyse des flits est réalisée localement. Tout d'abord, le routeur doit lire le flit arrivant tout en connaissant le flit précédent dans le même chemin. Après cela, tous les vecteurs de transitions sont construits. Un vecteur de transition est l'ensemble des transitions entre deux flits. Ensuite, les motifs de transitions sont identifiés pour chaque transition en fonction de leurs agresseurs directs. Une fois que tous les modèles de transition sont identifiés, la consommation d'énergie est augmentée en fonction du coût de tous les motifs de transitions identifiés. Cette méthode donne la consommation d'énergie des liens.

##### 4.2. Résultats de simulation

###### 4.2.1. Contexte

Les modèles de consommation d'énergie du routeur et du NI utilisés avec le modèle de liens sont les modèles de Noxim. Ces modèles ont été synthétisés avec une bibliothèque de technologie 65nm. Le modèle de consommation d'énergie des liens data-indépendant utilisé pour faire une comparaison équitable est le modèle des liens de Noxim. Il est important de rappeler que quel que soit le modèle lien data-indépendant utilisé pour la comparaison, ils sont tous basés sur la même équation de puissance comme indiqué dans la section II.B. La principale différence entre ORION 2.0, DSENT et le modèle de liens de Noxim est dans le nœud technologique utilisé. Des expériences sont effectuées avec un NoC 4x4 mesh-2D cadencé à 700 MHz avec un algorithme de routage XY. Les autres paramètres sont : des flits de 32 bits de largeur, la profondeur des buffers d'entrée est de quatre flits, la taille des paquets est de huit flits et la longueur des liens est de 3 mm. L'origine et la destination des paquets sont choisis au hasard avec

TABLE 3 – Classification des motifs de données selon le taux de commutation  $\alpha$  sur un bus huit bits

Type de motif des données	$\alpha$	Flit précédent	Flit courant
Meilleurs cas	0	00000000	00000000
	0,25	00000000	11000000
	0,5	00000000	11110000
	0,75	00000000	11111100
	1	00000000	11111111
Pires cas	0	00000000	00000000
	0,25	10000000	01000000
	0,5	10100000	01010000
	0,75	10101000	01010100
	1	10101010	01010101

0 : bits qui ne changent pas pendant la simulation

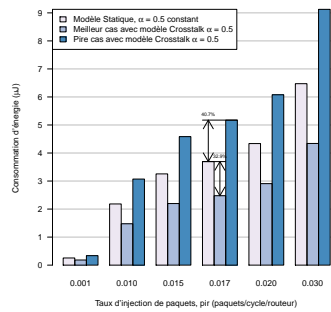


FIGURE 1 – Estimation de l'énergie des liens avec le modèle Statique et Crosstalk sous différents motifs de données et différents pir. Le taux de commutation  $\alpha$  est fixé à 0,5.

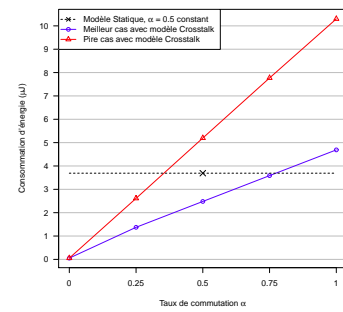


FIGURE 2 – Consommation d'énergie des liens avec le modèle Statique et Crosstalk sous différentes valeur de  $\alpha$  avec pir = 0,017.  $\alpha$  étant calculé selon les données des flits pendant les simulations.

un trafic uniforme. Les simulations sont donc exécutées pendant 100 000 cycles et sont répétées vingt fois dans toutes les configurations.

#### 4.2.2. Quelle est la précision des modèles de consommation d'énergie des liens data-indépendant basés sur l'équation (1) ?

Deux types de configurations de données sont générés pour estimer la précision du modèle de données indépendantes. La table 3 montre tous les motifs de données conçus pour nos expériences, nous pouvons voir deux types de motifs de données. Tout d'abord, les motifs de données des meilleurs cas sont ceux dont la consommation d'énergie est la plus faible selon le taux d'activité  $\alpha$  et la table 2. Deuxièmement, les motifs de données des pires cas sont ceux dont la consommation d'énergie est la plus élevée selon  $\alpha$  et la table 2. Ces données sont produites avec deux flits différents qui se suivent toujours les uns les autres et donnent un taux de commutation connu pendant toute la simulation. Si nous voulons voir le cas lorsque des liens consomment le moins et la plus grande quantité d'énergie à  $\alpha = 0,5$ , la moitié des bits changent à chaque transition selon le motif choisi, et les autres restent à 0. Ainsi, avec le pire des cas et le meilleur des cas à  $\alpha = 0,5$ , nous utilisons Noxim pour comparer le modèle data-dépendant avec le modèle data-indépendant dont  $\alpha$  est constant à 0,5.

La figure 1 montre l'énergie consommée par les liens estimée par le modèle de liens data-indépendant nommé Statique et le modèle prenant en compte le crosstalk nommé Crosstalk, sous différents taux d'injections de paquets (pir ou "packet injection rate" en anglais). Comme on peut le constater, les différences entre les deux modèles sont déjà perceptibles pour un pir de 0,001. Par ailleurs, cet écart reste le même à mesure que le pir progresse. Cependant, la consommation d'énergie des liens est de plus en plus importante. Il est montré dans [3] que la congestion est observée même pour de faibles densités de trafic dans le cas d'un NoC mesh-2D avec des paquets ayant des origines et des destinations aléatoires. Ainsi, notre comparaison de la consommation d'énergie se fera lorsque le NoC n'est pas encombré, avec pir = 0,017 lorsque le trafic est aléatoire. Si l'on compare la consommation de ces deux modèles, l'écart entre le modèle statique et le modèle proposé peut aller jusqu'à 40,7% pour le pire cas du modèle Crosstalk  $\alpha = 0,5$  et 32,9% pour le cas meilleur cas du modèle Crosstalk  $\alpha = 0,5$ .

Maintenant, nous étudions l'erreur d'estimation de l'énergie faite par le modèle statique dans lequel les taux d'activités  $\alpha$  observés sur les liens varient. Dans la figure 2, le pir est fixé à 0,017 et l'activité commutation  $\alpha$  varie dans l'intervalle [0, 1]. Les motifs des meilleurs et des pires cas sont construits en utilisant les motifs de données décrits dans la table 3. La consommation d'énergie des liens peut être comprise entre la courbe du pire cas et la courbe du meilleur cas estimée par le modèle Crosstalk. Le modèle de consommation d'énergie des liens Statique ne pouvant pas détecter les variations de  $\alpha$ , il montre ses limites lors de la simulation lorsque  $\alpha$  est différent de 0,5. Ce modèle est en permanence au-dessus du modèle data-dépendant de  $\alpha = 0$  à  $\alpha = 0,35$  et constamment en dessous de  $\alpha = 0,75$  à  $\alpha = 1$  (Voir Fig.2). En outre, la consommation d'énergie des liens avec le modèle data-dépendant à  $\alpha = 0,5$  peut être doublé, passant de 2,48µJ à 5,19µJ selon les données de flits, une différence supplémentaire

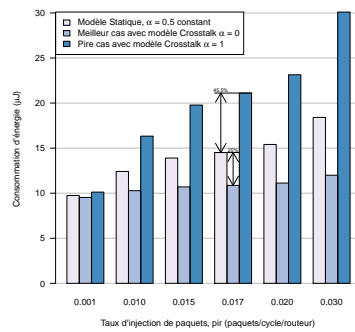


FIGURE 3 – Consommation d'énergie totale du NoC avec le modèle de liens statique et dynamique. Les résultats sont sous différents pir et avec deux motifs de données.

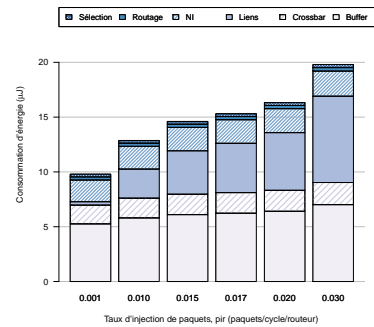


FIGURE 4 – Bilan de consommation d'énergie du NoC utilisant le modèle de liens proposé et avec des données aléatoires.

que le modèle statique ne peut pas remarquer parce que ce modèle n'est pas précis au bit-près. Ainsi, cette différence montre la nécessité d'utiliser un modèle de consommation d'énergie des liens bit-près. Pour conclure, nous pouvons affirmer que les modèles statiques ne peuvent pas fournir une estimation précise de l'énergie consommée par les liens.

#### 4.2.3. Quelle est la part de la consommation d'énergie des interconnexions dans la consommation du NoC ?

Nous abordons maintenant la question deux, qui est d'évaluer la part de la consommation d'énergie des liens dans l'ensemble de la consommation du NoC. Deux motifs de données sont utilisés comme deux scénarios extrêmes, cela va nous permettre d'évaluer la variation d'énergie maximale qui peut être attendue à l'ensemble de la consommation du NoC. Le premier motif de données est le meilleur cas avec  $\alpha = 0$  dans le tableau 3 et le second motif de données, est le pire des cas avec  $\alpha = 1$ .

La figure 3 montre l'impact de la consommation d'énergie des liens estimation sur l'ensemble de la consommation d'énergie du réseau. Contrairement à la figure 1, la différence entre la consommation totale d'énergie avec le modèle Statique et le modèle Crosstalk évolue avec le pir. Les écarts commencent à être significatifs lorsque  $pir = 0,010$  et devient de plus en plus important à mesure que le trafic augmente. Ceci est dû à la consommation d'énergie des liens qui devient importante par rapport aux autres composants. Pour  $pir = 0,017$ , l'estimation de la consommation totale d'énergie du modèle statique est 45,5% plus faible qu'avec le pire cas  $\alpha = 1$  du modèle Crosstalk. La différence avec le meilleur des cas est que la consommation totale d'énergie avec le modèle statique est 25% plus grande et donc cela définit un intervalle de 70,5 points de pourcentage. Sur la figure 4, on peut observer que la consommation d'énergie des liens devient le deuxième plus grand consommateur d'énergie à partir de  $pir = 0,010$  et devient le premier consommateur d'énergie lorsque le pir est au-delà de 0,020. Ces résultats montrent qu'il est nécessaire d'estimer précisément la consommation d'énergie des liens.

## 5. Conclusion

Cet article a étudié la part de l'énergie des routeurs et des liens. Les modèles de consommation de liens classiques manquent de précision et peuvent causer des erreurs d'estimation d'énergie du NoC allant jusqu'à 45,5%. En outre, nous montrons qu'avec le même  $\alpha$ , la consommation d'énergie des liens peut être doublée, un impact seulement visible en prenant en compte le crosstalk. Nos résultats montrent que la consommation d'énergie des liens peut être le 2<sup>e</sup> ou le 1<sup>er</sup> composant le plus consommateur d'énergie. Connaissant leur application cible, les concepteurs devraient être en mesure de générer des flits qui sont proches du trafic réel. La qualité de l'estimation de la consommation d'énergie de tout le NoC peut alors être augmentée significativement. En outre, le gain de précision apporté par l'addition de notre modèle dans Noxim pourrait être utile pour alimenter des modèles thermiques de circuits comme Hotspot [8] utilisé dans les contributions actuelles comme celle-ci concernant le routage dans un NoC 3D [6].

## Bibliographie

1. International technology roadmap for semiconductors. (2013). – Available : <http://www.itrs.net>. [Online].
2. Nirgam. – Available : <http://www.nirgam.ecs.soton.ac.uk>. [Online].
3. Bomel (P.) et Sevaux (M.). – Parallel deadlock detection and recovery for networks-on-chip dedicated to diffused computations. – In *Digital System Design (DSD), 2013 Euromicro Conference on*, pp. 29–36, Sept 2013.
4. Courta y (A.), Laurent (J.), Julien (N.) et Sentieys (O.). – New directions in interconnect performance optimization. – In *Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, 2008. DTIS 2008. 3rd International Conference on*, pp. 1–6, March 2008.
5. Dally (W. J.) et Poulton (J. W.). – *Digital systems engineering*. – Cambridge University Press, 1998.
6. Du (G.), Liu (X.), Song (Y.), Zhang (D.), Ou (Y.) et Li (M.). – A temperature gradient based routing algorithm on 3d noc. – In *Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2014 International Conference on*, pp. 1–5, July 2014.
7. Fazzino (F.), Palesi (M.) et Patti (D.). – Noxim : Network-on-chip simulator. – Available : <http://noxim.sourceforge.net/>. [Online].
8. Huang (W.), Ghosh (S.), Velusamy (S.), Sankaranarayanan (K.), Skadron (K.) et Stan (M.). – Hotspot : a compact thermal modeling methodology for early-stage vlsi design. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 14, n5, May 2006, pp. 501–513.
9. Kahng (A.), Li (B.), Peh (L.-S.) et Samadi (K.). – Orion 2.0 : A power-area simulator for interconnection networks. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, n1, Jan 2012, pp. 191–196.
10. Rabaey (J. M.), Chandrakasan (A. P.) et Nikolic (B.). – *Digital integrated circuits : A design perspective*. – Pearson Education, 2003, 135–175p.
11. Reehal (G.) et Ismail (M.). – A systematic design methodology for low-power nocs. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, n12, Dec 2014, pp. 2585–2595.
12. Sun (C.), Chen (C.-H.), Kurian (G.), Wei (L.), Miller (J.), Agarwal (A.), Peh (L.-S.) et Stojanovic (V.). – Dsent - a tool connecting emerging photonics with electronics for opto-electronic networks-on-chip modeling. – In *Networks on Chip (NoCS), 2012 Sixth IEEE/ACM International Symposium on*, pp. 201–210, May 2012.
13. Taylor (M.), Kim (J.), Miller (J.), Wentzlaff (D.), Ghodrat (F.), Greenwald (B.), Hoffman (H.), Johnson (P.), Lee (J.-W.), Lee (W.), Ma (A.), Saraf (A.), Seneski (M.), Shnidman (N.), Strumpen (V.), Frank (M.), Amarasinghe (S.) et Agarwal (A.). – The raw microprocessor : a computational fabric for software circuits and general-purpose programs. *Micro, IEEE*, vol. 22, n2, Mar 2002, pp. 25–35.