

# REALISATION D'UN RESERVOIR COMPUTER OPTOELECTRONIQUE ENTIEREMENT ANALOGIQUE

François Duport<sup>1</sup>, Anteo Smerieri<sup>1</sup>, Akram Akrou<sup>2</sup>, Marc Haelterman<sup>1</sup> et Serge Massar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Service OPERA-Photonique, Université Libre de Bruxelles (ULB), CP194/5, Av. F.D. Roosevelt  
50, 1050 Bruxelles, Belgique

<sup>2</sup> Laboratoire d'Information Quantique, Université Libre de Bruxelles (ULB), CP225, Av. F.D.  
Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgique

[Francois.DUPORT@ulb.ac.be](mailto:Francois.DUPORT@ulb.ac.be)

## RÉSUMÉ

Nous présentons ici la première réalisation expérimentale d'un "reservoir computer" capable, après entraînement, de traiter l'information sans aucun pré ni post traitement de signal. Un "reservoir computer" est une forme particulière de réseaux de neurones artificiels qui se prête bien aux implémentations physiques. Cette expérience se base sur notre précédente réalisation de "reservoir computer" optoélectronique utilisant un oscillateur à boucle à retard optique. Le prétraitement des signaux d'entrée a été remplacé par une modulation du signal optique d'entrée et une couche physique produit le signal de sortie qui était auparavant calculé sur un ordinateur. Les résultats obtenus pour l'égalisation d'un canal non linéaire sont la première preuve expérimentale qu'il est possible de réaliser de manière physique un tel système de bout en bout. Cette avancée majeure ouvre la voie à la réalisation de systèmes autonomes pour le traitement du signal de manière non conventionnelle.

**MOTS-CLEFS :** *reservoir computing ; optique non linéaire ; calcul optique.*

## 1. INTRODUCTION

Les "reservoir computers" sont une forme particulière de réseaux de neurones artificiels récurrents introduite au début du siècle [1]. Leurs capacités pour le traitement de signaux dépendants du temps ont déjà été démontrées de manière théorique [2],[3] et expérimentale [4]-[8]. De tels systèmes sont très versatiles et sont capables de classer des signaux (par exemple pour la reconnaissance vocale de chiffres, ou l'égalisation d'un canal non linéaire) ou de prédire l'évolution d'une série temporelle (prédire l'évolution d'un signal radar)[4],[5]. Le "reservoir computer" que nous présentons ici utilise notre précédente implémentation optoélectronique à laquelle nous avons ajouté une couche d'entrée analogique et une couche physique de sortie. Il s'agit de la première démonstration entièrement expérimentale d'un tel système. Après avoir présenté brièvement le principe de fonctionnement des "reservoir computers", nous décrivons notre expérience et présenterons nos résultats obtenus pour l'égalisation de canal avant de conclure.

## 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES "RESERVOIR COMPUTERS"

Un "reservoir computer" est composé de trois couches : une d'entrée, le "reservoir" en lui-même, et une de sortie. Pour simplifier les notations nous considérons ici un temps discret  $n$ . Le "reservoir" est constitué de  $N$  variables internes non linéaires (notées  $x_i$ ) interconnectées entre elles par la matrice  $A_{ij}$ . Dans la couche d'entrée, le vecteur  $M_i$  applique le signal d'entrée  $u(n)$  à chaque variable interne  $x_i(n)$ . Dans la couche de sortie, le vecteur  $W_i$  combine linéairement ces  $N$  variables internes  $x_i$  pour obtenir la sortie  $y(n)$ . La fonction  $F_{NL}$  représente les non-linéarités des variables internes. Les équations d'évolution du "reservoir" et du signal de sortie sont les suivantes :

$$x_i(n) = F_{NL} \left( \sum_{j=1}^N \alpha A_{ij} x_j(n-1) + \beta M_i u(n) \right) \quad y(n) = \sum_{i=1}^N W_i x_i(n) \quad (1)$$

Habituellement, le vecteur d'entrée  $M_i$  et la matrice d'interconnexion  $A_{ij}$  sont choisis aléatoirement avant l'expérience, seuls les gains  $\alpha$  et  $\beta$  sont ajustés pendant l'expérience. Pour chaque couple de valeurs  $\alpha$  et  $\beta$ , le vecteur de sortie  $W_i$  est optimisé par régression linéaire pendant une première phase d'entraînement. Puis, lors de la phase de test, le vecteur ainsi calculé est utilisé pour produire la sortie et évaluer sa qualité. Contrairement au fonctionnement des réseaux de neurones artificiels classiques, le choix préalable du vecteur d'entrée  $M_i$  et de la matrice d'interconnexion  $A_{ij}$  opéré pour les "reservoir computers" simplifie grandement les calculs nécessaires leur optimisation. Ces "reservoir computers" se prêtent bien à des implémentations physiques pour la même raison.

### 3. IMPLEMENTATION PHYSIQUE

Dans cette expérience, nous utilisons 47 variables internes ( $N=47$ ). La figure 1 présente notre montage expérimental et son schéma fonctionnel (avec un cliché des variables internes à un instant fixe du temps). Chaque variable interne  $x_i(n)$  correspond à la puissance optique pendant un temps  $\theta$ . Chaque incrément du temps discret  $n$  correspond à un temps  $T=N\theta$ . Le délai  $T$  de la boucle à retard est égale à  $T=(N+5)\theta$ . Chaque variable interne  $x_i$  n'est ainsi connectée qu'à une seule autre  $x_{i-5}$ . L'architecture des interconnexions entre variables internes est donc similaire à celle d'un registre à décalage. Cette architecture, ou les temps  $T'$  et  $T$  sont désynchronisés est discutée en détail dans [4]. Dans notre expérience, le vecteur d'entrée  $M_i$  est remplacé par un signal continu  $m(t)$ , somme de deux signaux sinusoïdaux de périodes  $T'/7$  et  $T'/9$ , qui module l'entrée  $u(n)$  du "reservoir".

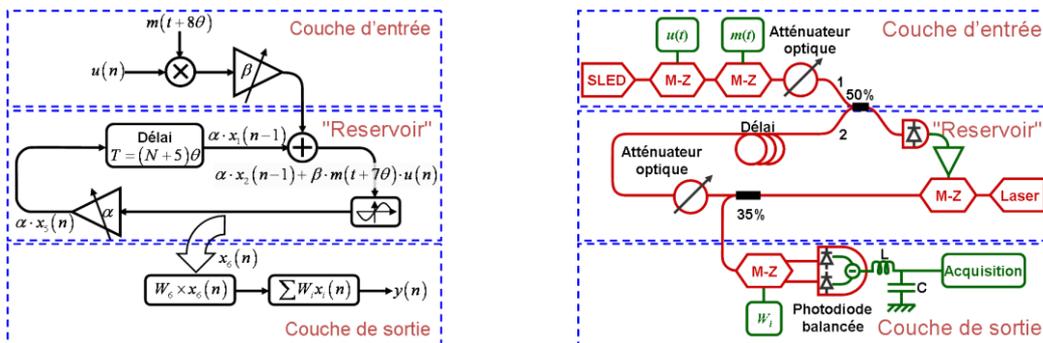


Fig. 1 : Schéma fonctionnel (à gauche) et schéma expérimental (à droite) de notre "reservoir computer" entièrement analogique. Les éléments optiques du montage sont en rouge, ceux électriques sont en vert.

Le modulateur Mach-Zehnder placé dans la boucle du "reservoir" permet d'avoir des variables internes non linéaires. Une partie (35%) de la puissance optique à sa sortie est collectée pour construire le signal de sortie dans la couche physique de sortie. Le reste passe par un atténuateur variable qui permet d'ajuster le gain  $\alpha$  de rétroaction puis par une bobine de fibre optique d'environ 1,7 km de long. En sortie de cette bobine le signal est additionné au signal optique d'entrée à l'aide d'un coupleur optique (50%) avant d'être détecté par une photodiode (bande passante : 125MHz) puis de passer par un amplificateur RF (gain : 27dB, bande passante : 50kHz-130MHz) afin d'alimenter l'entrée électrique du modulateur. Le temps de parcours  $T$  de la boucle optoélectronique ainsi réalisée est d'environ 8,4 $\mu$ s.

La couche d'entrée utilise une source lumineuse incohérente (SLED) pour éviter les interférences avec le laser utilisé dans le "reservoir". La sortie de cette SLED est d'abord modulée pour générer le signal optique d'entrée. Ce signal est ensuite modulé par le masque  $m(t)$  de période  $T'$  égale à 7,59 $\mu$ s puis passe par un atténuateur variable qui permet d'ajuster le gain  $\beta$ .

La couche physique de sortie utilise la combinaison d'un modulateur Mach-Zehnder ayant deux sorties complémentaires et d'une photodiode balancée pour appliquer le vecteur de sortie  $W_i$  (dont chaque composante peut ainsi être positive ou négative) aux variables internes. La somme de ces produits nécessaire à l'obtention du signal de sortie est réalisée à l'aide d'un filtre passe bas du second ordre. La réponse impulsionnelle de ce filtre est mesurée pour être prise en compte lors du calcul du vecteur de sortie  $W_i$ .

#### 4. RESULTATS POUR L'EGALISATION D'UN CANAL NON LINEAIRE

Nous avons testé le "reservoir computer" ainsi réalisé pour égaliser un canal à délais multiples faiblement non linéaire [1] avec un rapport signal à bruit (SNR) variant de 12 à 32 dB à la sortie du canal. Les résultats présentés à la figure 2 donnent le taux d'erreur symbole (SER) sur la séquence de test de 6000 symboles. Ils sont comparés à notre précédente implémentation optoélectronique [4] et sont comparables à l'état de l'art.

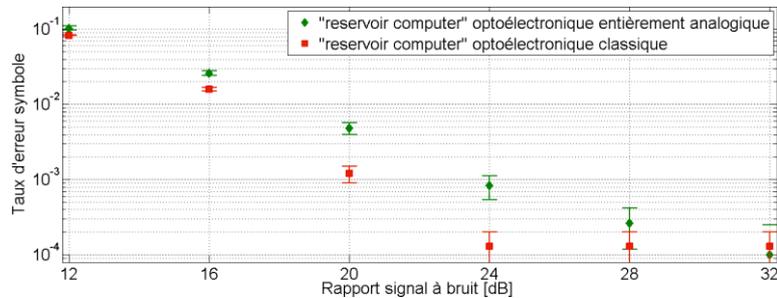


Fig. 2 : Egalisation de canal.

#### CONCLUSION

Nous avons présenté ici la première réalisation entièrement analogique d'un "reservoir computer" optoélectronique. Les résultats obtenus sont comparables à l'état de l'art et démontrent qu'il est possible d'égaliser un canal non linéaire sans aucun pré ni post traitement des signaux. Cette avancée majeure dans le domaine des "reservoir computer" expérimentaux devra être confirmée par des tests pour réaliser d'autres fonctions comme la prédiction de signaux. Elle laisse cependant entrevoir la possibilité de faire du traitement de signaux en optique et de manière entièrement analogique, ouvrant un nouveau champ de recherche pour le traitement non conventionnel de l'information en bénéficiant des énormes potentiels des systèmes optiques notamment en termes de rapidité et de parallélisme.

#### REMERCIEMENTS

Nous bénéficions du soutien financier du Fond de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS, Belgique) ainsi que du projet Photonics@be (IAP P7/35) des Pôles d'Attraction Interuniversité (Belgian Science Policy).

#### RÉFÉRENCES

- [1] H. Jaeger and H. Haas, "Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication." *Science (New York, N.Y.)*, vol. 304, no. 5667, pp. 78–80, Apr 2004.
- [2] A. Rodan and P. Tino, "Minimum complexity echo state networks", *IEEE T. Neural Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 131–144, 2011.
- [3] M. Lukoševičius and H. Jaeger, "Reservoir computing approaches to recurrent neural network training", *Computer Science Review*, vol. 3, no. 3, pp. 127–149, Aug 2009.
- [4] Y. Paquot, F. Dupont, A. Smerieri, J. Dambre, B. Schrauwen, M. Haelterman, and S. Massar, "Optoelectronic Reservoir Computing", *Scientific Reports*, vol. 2, Feb 2012.
- [5] F. Dupont, B. Schneider, A. Smerieri, M. Haelterman, and S. Massar, "All-optical reservoir computing", *Optics Express*, vol. 20, no. 20, pp. 22783–22795, Sept 2012.
- [6] L. Larger, M.C. Soriano, D. Brunner, L. Appeltant, J.M. Gutierrez, L. Pesquera, C.R. Mirasso, and I. Fischer, "Photonic information processing beyond Turing: an optoelectronic implementation of reservoir computing", *Optics Express*, vol. 20, no. 3, pp. 3241–3249, Jan 2012.
- [7] D. Brunner, M.C. Soriano, C.R. Mirasso, and I. Fischer, "Parallel photonic information processing at gigabyte per second data rates using transient states", *Nature Communications*, vol. 4, no. 1364, Jan 2013.
- [8] K. Vandoorne, P. Mechet, T. Van Vaerenbergh, M. Fiers, G. Morthier, D. Verstraeten, B. Schrauwen, J. Dambre, and P. Bienstman, "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip", *Nature Communications*, vol. 5, no 3541, 2014.