

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale

WO 2024/256691 A1

(43) Date de la publication internationale
19 décembre 2024 (19.12.2024)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :

G06N 3/044 (2023.01) G06E 3/00 (2006.01)
G06N 3/067 (2006.01) G06N 3/049 (2023.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2024/066670

(22) Date de dépôt international :

14 juin 2024 (14.06.2024)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

FR2306106 15 juin 2023 (15.06.2023) FR

(71) Déposant : THALES [FR/FR] ; 4 Rue de la Verrerie, 92190 Meudon (FR).

(72) Inventeurs : DE ROSSI, Alfredo ; c/o Thales Research & Technology Campus Polytechnique, 1, Avenue Augustin Fresnel, 91767 PALAISEAU CEDEX (FR). BOI-KOV, Ivan ; c/o Thales Research & Technology Campus Polytechnique, 1, Avenue Augustin Fresnel, 91767 PALAISEAU CEDEX (FR).

(74) Mandataire : DOMENEGO, Bertrand et al. ; Lavoix, 2 place d'Estienne d'Orves, 75441 Paris Cedex 09 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

(54) Title: PHOTONIC CIRCUIT ARCHITECTURE FOR RESERVOIR COMPUTING

(54) Titre : ARCHITECTURE DE CIRCUITS PHOTONIQUES POUR UN CALCUL PAR RÉSERVOIR

(57) Abstract: The present invention relates to a photonic circuit architecture for analogue reservoir computing, the architecture comprising: - an input for an input optical signal; - a reservoir circuit (24) capable of receiving a first intermediate signal ($\tilde{S}$) dependent on the input optical signal and of converting the first intermediate signal ($\tilde{S}$) into a converted signal, the reservoir circuit (24) being formed by coupled optical resonators (42), the reservoir circuit (24) being devoid of delay lines between the optical resonators (42); - a readout circuit capable of receiving a second intermediate signal dependent on the converted signal and of generating an output optical signal according to the second intermediate signal; and - an output for the output optical signal.

(57) Abrégé : La présente invention concerne une architecture de circuits photoniques pour un calcul analogique par réservoir, l'architecture comprenant : - une entrée pour un signal optique d'entrée, - un circuit réservoir (24) propre à recevoir un premier signal intermédiaire ($\tilde{S}$) dépendant du signal optique d'entrée et à convertir le premier signal intermédiaire ($\tilde{S}$) en un signal converti, le circuit réservoir (24) étant formé de résonateurs optiques (42) couplés, le circuit réservoir (24) étant dépourvu de lignes à retard entre les résonateurs optiques (42), - un circuit de lecture propre à recevoir un second signal intermédiaire dépendant du signal converti et à générer un signal optique de sortie en fonction du second signal intermédiaire, et - une sortie pour le signal optique de sortie.

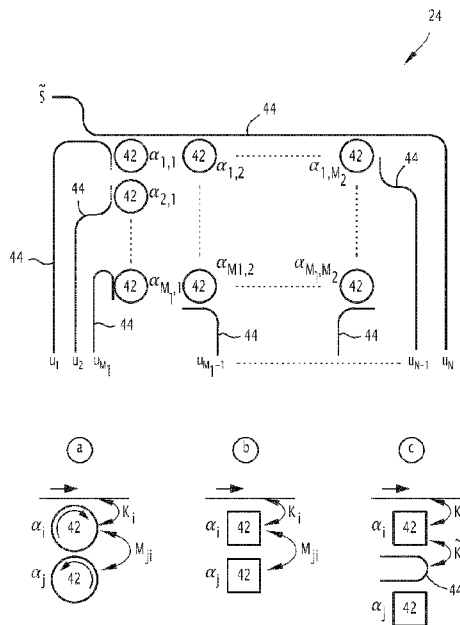


FIG.2



WO 2024/256691 A1

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

- *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*
- *en noir et blanc ; la demande internationale telle que déposée était en couleur ou en échelle de gris et est disponible sur PATENTSCOPE pour téléchargement.*

DESCRIPTION

Architecture de circuits photoniques pour un calcul par réservoir

5

La présente invention concerne une architecture de circuits photoniques pour un calcul analogique par réservoir. La présente invention concerne aussi un procédé de filtrage non-linéaire d'un signal optique mis en œuvre par une telle architecture.

10 Les signaux analogiques émanant de l'extérieur ont généralement une forme non directement exploitable pour la réalisation de calculs ou pour l'analyse. En conséquence, il convient d'appliquer un traitement à ces signaux pour éliminer le bruit, compenser les distorsions et extraire l'information pertinente.

Ces opérations sont généralement réalisées dans le domaine numérique, par des filtres linéaires et non-linéaires et, depuis le développement du « machine learning », par
15 des réseaux neuronaux. Par exemple, le filtrage et d'autres opérations linéaires sont classiquement effectués pour décoder des formats de modulation avancés dans les télécommunications (mais il y a aussi le domaine de l'analyse des signaux radar, les communications espace libre, les capteurs en général, et encore d'autres domaines). La distorsion est quant à elle corrigée à l'aide d'une électronique numérique rapide, mais très
20 consommatrice d'énergie. Dans l'approche conventionnelle, les réseaux neuronaux sont de type à propagation avant (en anglais « feed-forward ») à travers d'un grand nombre de couches. Grace à l'algorithme de propagation en arrière (en anglais « back propagation »), ils peuvent apprendre un grand nombre de tâches complexes. Ces réseaux de neurones sont basés sur des architectures de calcul traditionnel (Von Neumann) et de ce fait
25 consomment une quantité d'énergie conséquente, en particulier pendant la phase d'apprentissage. Afin de réduire la consommation d'énergie, on considère une mise en œuvre analogique des réseaux de neurones.

Dans le calcul analogique, les lois de la physique sont utilisées pour mettre en œuvre des opérations mathématiques spécifiques. De ce fait, un ordinateur analogique présente
30 l'avantage d'être potentiellement moins consommateur d'énergie qu'un ordinateur numérique. En outre, en fonction de la loi physique considérée, un ordinateur analogique peut également s'avérer plus rapide. De plus, le décalage entre l'entrée et la sortie du signal, c'est-à-dire la latence, est en principe minimisé.

Le calcul analogique peut être mise en œuvre de différentes manières, et en
35 particulier sur le modèle de l'ordinateur à réservoir (en anglais « reservoir computing »). Un

ordinateur à réservoir est un système dynamique non-linéaire suffisamment complexe, dont l'état interne est décrit par la valeur de certaines grandeurs physiques, par exemple le champ électrique, à des positions fixées dans l'espace, qu'on appelle « nœuds internes ». L'évolution d'un ordinateur à réservoir est régie par des paramètres dictant la connexion
 5 entre les nœuds. La sortie est générée en connectant les nœuds internes du réservoir à des nœuds de sortie.

L'ordinateur à réservoir est robuste en ce qui concerne les tolérances de fabrication. La formation est simplifiée dans les réseaux à état d'écho (en anglais « Echo State Networks », abrégé en ESN), car seuls les nœuds de connexion externes sont formés.

10 Les ESN sont régis par l'équation suivante :

$$\vec{x}_n = (1 - \alpha)\vec{x}_{n-1} + \alpha \tanh(\widehat{W}_{in}[1; \vec{u}_n]^T + \widehat{W}\vec{x}_{n-1}) \quad (1)$$

où :

- $\vec{x}_n$ est l'état du réseau à l'instant n,
- $\vec{x}_{n-1}$ est l'état du réseau à l'instant n-1,
- 15 • α est un paramètre entre 0 et 1.
- $\widehat{W}_{in}$ est une matrice projetant les entrées sur l'état .
- $\vec{u}_n$ est le signal d'entrée à l'instant n,
- $\widehat{W}$ est la matrice de poids du réservoir, transformant l'état n en l'état n+1 avant transformation non linéaire (tangente hyperbolique $y=\tanh(x)$).

20 Le signal de sortie $\vec{y}_n$ d'un réseau ESN est une combinaison linéaire des états des neurones, à savoir :

$$\vec{y}_n = W_{out}\vec{x}_n$$

Où :

- W_{out} est une matrice projetant l'état vers les sorties.

25 La simplicité de la lecture permet d'utiliser la régression pseudo-orthogonale (en anglais « ridge regression ») pour effectuer un apprentissage rapide et facile qui converge toujours. Un autre avantage est que l'ESN est robuste face à la variation des paramètres du système.

Parallèlement à l'introduction des ESN, des machines à « état liquide » (en anglais
 30 « Liquid State Machines », abrégé en LSM) ont été proposées. D'un point de vue conceptuel, elles sont similaires aux ESN, mais elles ont été conçues dès le départ pour une mise en œuvre matérielle, ce qui implique également une description mathématique où le temps est une variable continue, par opposition aux ESN dont l'état évolue par

« sauts » d'intervalles temporels discrets. Les deux concepts ont ensuite été regroupés et appelés calcul par réservoir (en anglais « Reservoir Computing », abrégé en RC).

Dans le domaine de la photonique, le RC considère la propagation de la lumière dans une puce à base de guides d'ondes et autres composants, que l'on appelle circuit photonique intégré. Dans l'état de la technique, des implémentations d'un calcul par réservoir sont réalisées par propagation de la lumière entre les "nœuds". Une variante consiste à injecter le signal dans un seul nœud qui est reconnecté à lui-même par une ligne à retard optique. Dans les réalisations connues en photonique, une partie des opérations décrites par l'équation 1 est effectué par l'électronique.

Néanmoins, dans les deux cas, cela implique l'utilisation d'une électronique très rapide ou de longues lignes de retard afin d'assurer la séparation des signaux dans des créneaux temporels. De telles lignes de retard sont encombrantes et engendrent des pertes supplémentaires.

Il existe donc un besoin pour une implémentation d'un calcul par réservoir avec une architecture compacte tout en limitant les pertes.

A cet effet, la présente description a pour objet une architecture de circuits photoniques pour un calcul analogique par réservoir, l'architecture comprenant :

- une entrée pour un signal optique d'entrée,
- un circuit réservoir propre à recevoir un premier signal intermédiaire dépendant du signal optique d'entrée et à convertir le premier signal intermédiaire en un signal converti, le circuit réservoir étant formé de résonateurs optiques couplés, le circuit réservoir étant dépourvu de lignes à retard entre les résonateurs optiques,
- un circuit de lecture propre à recevoir un second signal intermédiaire dépendant du signal converti et à générer un signal optique de sortie en fonction du second signal intermédiaire et
- une sortie pour le signal optique de sortie.

Suivant des modes particuliers de mise en œuvre, l'architecture comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- chaque résonateur optique est directement couplé à ses proches voisins avec un taux de couplage et/ou à un guide d'onde avec un taux de couplage ;
- chaque résonateur optique a une fréquence optique de résonance correspondant au mode résonant, les résonateurs optiques ayant une réponse non-linéaire de sorte que

la fréquence optique de résonance de chaque résonateur optique dépend de l'énergie stockée dans ce même résonateur optique ;

- le signal se propageant entre l'entrée et la sortie de l'architecture est uniquement un signal optique, sans conversion dans le domaine électrique ;

5 - le circuit réservoir et le circuit de lecture sont chacun réalisés sous la forme d'un circuit photonique intégré ;

- le signal optique de sortie est une somme cohérente des champs optiques dans les résonateurs optiques du circuit réservoir ;

10 - le circuit de lecture comprend des sorties additionnelles pour des signaux additionnels, les signaux additionnels étant obtenus par le circuit de lecture en fonction du second signal intermédiaire ;

- le circuit de lecture comprend N ou N-1 modulateurs de phase et N-1 séparateurs variables connectés aux modulateurs de phase ;

15 - chaque séparateur variable est mis en œuvre au moyen de deux modulateurs de phase dans un interféromètre de Mach-Zehnder ;

- l'architecture comprend :

20 - un premier circuit optique d'amplification et de filtrage connecté entre l'entrée et le circuit réservoir, le premier circuit optique étant propre à générer le premier signal intermédiaire à partir du signal optique d'entrée, et

- un second circuit optique d'amplification et de filtrage connecté entre le circuit réservoir et le circuit de lecture, le second circuit optique étant propre à générer le second signal intermédiaire à partir du signal converti.

25 La présente invention a aussi pour objet un procédé de filtrage non-linéaire d'un signal optique mis en œuvre par une architecture telle que décrite précédemment.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui suit de modes de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemple uniquement et en référence aux dessins qui sont :

30 - figure 1, une représentation schématique d'un exemple d'une architecture de circuits photoniques pour un calcul par réservoir, l'architecture comprenant un circuit réservoir et un circuit de lecture,

- figure 2, une représentation schématique d'un exemple d'implémentation du circuit réservoir de la figure 1,

- figure 3, une représentation schématique d'un exemple du circuit de lecture de la figure 1,

- figure 4, une représentation schématique d'un exemple d'implémentation du circuit de lecture de la figure 3, le circuit de lecture comprenant des modulateurs de phase et des séparateurs variables connectés aux modulateurs de phase,

- figure 5, une représentation schématique d'un exemple d'un modulateur de phase de la figure 4, et

- figure 6, une représentation schématique d'un exemple d'un séparateur variable de la figure 4.

Une architecture 10 de circuits photoniques pour un calcul par réservoir est illustrée par la figure 1. Le calcul par réservoir est mentionné en introduction. Plus généralement, le calcul par réservoir est un cadre de calcul dérivé de la théorie des réseaux de neurones récurrents qui projette un ou plusieurs signaux d'entrée dans des espaces de calcul de dimension supérieure au moyen de la dynamique d'un système fixe et non linéaire, appelé réservoir. Une fois que le signal d'entrée est introduit dans le réservoir, qui est traité comme une « boîte noire », un mécanisme de lecture est entraîné pour lire l'état du réservoir et le projette à la sortie souhaitée.

Notamment, l'architecture est propre à transformer un signal optique selon une loi que l'architecture (partie réservoir) apprend à partir de séquences d'entrées et de sorties d'entraînement.

En particulier, le réservoir de l'architecture (circuit réservoir + circuit de lecture) opère en deux modes : « entraînement » et « inférence ». Dans le premier mode (entraînement), on présente à l'architecture 10 un signal d'entrée S et une sortie attendue Y_{expect} , on compare celle-ci avec la sortie Y du circuit de lecture et on varie les paramètres W_{out} du réservoir jusqu'à la minimisation de l'erreur. Dans la phase de « inférence », les paramètres W_{out} sont figés.

Une telle architecture 10 est, par exemple, propre à être utilisée comme filtre non-linéaire sur des signaux optiques, par exemple des signaux télécoms, ou bien des signaux radar sur porteuse optique. Dans une application particulière, l'architecture 10 est utilisée pour la correction de distorsions de signaux télécoms.

Dans l'exemple illustré par la figure 1, l'architecture 10 comprend une entrée 20 pour un signal optique d'entrée S , un premier circuit optique 22 d'amplification et de filtrage, un circuit réservoir 24, un second circuit optique 26 d'amplification et de filtrage, un circuit de lecture 28 et une sortie 30 pour un signal de sortie O . A noter que le premier circuit optique 22 et le second circuit optique 26 sont optionnels.

Sur l'exemple de la figure 1, il est aussi illustré un bloc électronique 32 utilisé, d'une part, lors d'une phase préalable d'entraînement visant à fixer les paramètres du circuit de lecture 28, et d'autre part, afin de contrôler le premier circuit optique 22, le circuit réservoir 24 et le second circuit optique 26. Le bloc électronique 32 est optionnel lors de la phase d'inférence, c'est-à-dire une fois la phase d'entraînement terminée et les paramètres du circuit de lecture 28 fixés.

L'entrée 20 est propre à recevoir le signal optique d'entrée S. Le signal optique d'entrée S a une largeur de bande BW, une fréquence porteuse ν_0 et une puissance optique moyenne P_m .

Le premier circuit optique 22 d'amplification et de filtrage est connecté entre l'entrée 20 et le circuit réservoir 24. Le premier circuit optique 22 est propre à amplifier et filtrer le signal optique S pour obtenir un premier signal intermédiaire $\tilde{S}$. La partie amplificatrice peut être réalisée en technologie intégrée photonique en phosphore d'indium et couplée à un circuit photonique silicium ou nitrure de silicium effectuant le filtrage.

Dans un exemple d'implémentation illustré par la figure 1, le premier circuit optique 22 comprend un module d'amplification 34 avec un gain G et un module de filtrage 36 (filtre passe-bas par exemple). Le gain G permet de ramener la puissance optique au niveau optimal pour le fonctionnement du circuit réservoir 24. La bande passante du filtre BWF est ajustée pour éliminer les composantes spectrales en dehors de la bande du signal S. Le premier circuit optique 22 peut se composer de plusieurs étages amplificateur-filtre.

Lorsque l'architecture 10 est dépourvue de premier circuit optique 22, le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ est le premier signal optique S.

Le circuit réservoir 24 est propre à réaliser la fonction calcul par réservoir.

Le circuit réservoir 24 est propre à recevoir le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ et à convertir le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ en un signal converti U. Le circuit réservoir 24 forme le réservoir de l'architecture 10.

Dans un exemple de mise en œuvre, le circuit réservoir 24 est propre à transformer le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ en le signal converti U sur la base de l'équation suivante :

$$\dot{\alpha} = f_p(\alpha, \tilde{S}) \quad (2)$$

Où :

- α est un vecteur représentant l'état interne du circuit réservoir. Chaque composante α_m est un nombre complexe tel que le champ électrique résonnant à fréquence optique dans chaque cavité m contenue dans le réservoir s'écrit $\vec{E}_m(\vec{r}, t) = \alpha_m(t)\vec{\psi}(\vec{r})$, et

- f_p est une fonction (plus précisément un opérateur non-linéaire $C^M \times C^L \rightarrow C^M$, où M est le nombre de résonateurs et L le nombre de signaux) modélisant l'évolution du champ U dans le réservoir forcée par le signal $\tilde{S}$.

Le signal converti U est proportionnel à un sous ensemble de N résonateurs tels
 5 que $U_i = \alpha_i \sqrt{\kappa_{il}}$, avec κ_{il} les coefficients représentant le couplage du résonateur i avec le guide l.

Ce formalisme correspond à l'approximation couramment utilisée dans le domaine de la photonique et qui prend le nom de « théorie des modes couplés » [H. Haus, et al. "Coupled-mode theory." Procs. IEEE 79.10 (1991): 1505-1518.]

10 Le circuit réservoir 24 est formé de résonateurs optiques 42 couplés. Les résonateurs optiques 42 sont, par exemple, répartis dans un arrangement de $M_1 \times M_2$ résonateurs (figure 2). Les résonateurs optiques sont aussi appelés cavités optiques, ou tout simplement cavités, dans ce qui suit.

Le circuit réservoir 24 est dépourvu de lignes à retard entre les résonateurs
 15 optiques 42. Une ligne à retard optique est par exemple un guide d'onde dont la longueur est telle que le temps de propagation de la lumière est de l'ordre de $\tau = \frac{1}{BW} \sim 100$ ps. Dans les applications visées, la longueur est de l'ordre de 1 cm. Un guide d'ondes de longueur de $\ll 1$ mm n'est pas une ligne à retard, dans le contexte opérationnel considéré. Les différents résonateurs optiques 42 ne sont pas reliés les uns aux autres par des lignes à
 20 retard.

Le circuit réservoir 24 est réalisé intégralement à partir de composants optiques.

Par exemple, le circuit réservoir 24 est réalisé en technologie photonique sur silicium, nitrure de silicium, niobate de lithium, ou encore phosphore d'indium.

Les résonateurs sont par exemple des anneaux de silicium posés sur un substrat
 25 de faible indice, par exemple silice. Les anneaux sont formés en rebouclant des guides d'ondes. Les guides d'ondes sont par exemple des rubans de silicium dont la largeur est de l'ordre de 500 nm (entre 300 nm et 100nm) et la hauteur entre 100 et 600 nm (selon les matériaux). La géométrie (hauteur/largeur) est choisie en fonction des matériaux afin de minimiser les pertes (atténuation par diffusion) et contrôler le nombre des modes
 30 transverses, sous contrainte des standards imposés par les fonderies. Le rayon de l'anneau, ou une forme alternative (ex. « circuit ») est choisi afin de minimiser les pertes d'insertion et fixer l'intervalle spectral libre (ISL), en anglais « Free Spectral Range » (FSR). Dans notre cas, ISL est choisi $\gg BW$, ce qui fixe la valeur maximale du rayon $R = v_g / (2\pi \cdot ISL)$, où v_g est la vitesse de groupe de la lumière dans le guide d'onde, typiquement
 35 $v_g \sim 0.25 \cdot c_0$, avec c_0 la vitesse de la lumière dans le vide. La distance entre anneaux est

comparable à la longueur d'onde ($\sim 1.5\mu\text{m}$), typiquement entre 200 nm et $2\mu\text{m}$, selon les technologies, ce qui induit un couplage optique entre deux (ou davantage) résonateurs. Un exemple de chaîne de résonateurs couplés est décrit ici [F. Xia, et al., "Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects," Opt. Express 15, 11934-11941 (2007)]

En alternative, les résonateurs peuvent être réalisés en approchant des cavités optiques de type « cristaux photoniques », comme décrit dans cette publication [E. Yüce, et al. "Adaptive control of necklace states in a photonic crystal waveguide." ACS photonics 5.10 (2018): 3984-3988.].

Dans un exemple d'implémentation illustré par la figure 2, il est représenté une architecture de réservoir à base de résonateurs en anneaux (ou bien de type « circuit », racetrack en anglais, ou micro-disque) organisés selon une matrice. Chaque résonateur optique 42 (ou cavité optique) est couplé aux résonateurs optiques proche voisins directement selon un taux de couplage mutuel μ et certains résonateurs optiques 42 sont couplés à un guide d'onde 44 avec un taux de couplage κ . Le taux de couplage κ exprime le taux de décroissance de l'énergie stockée dans le résonateur optique 42 en raison de l'écoulement d'une partie de celle-ci dans le guide d'onde. Les taux de couplage κ et μ diminuent quand la distance entre anneaux et anneaux et guide d'ondes augmente. Cette distance est donc choisie afin d'obtenir la valeur souhaitée du couplage. En particulier, dans cet exemple, un guide d'onde est utilisé pour se connecter au premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ et tous les autres sont associés à N sorties. Ainsi, les guides d'onde sont seulement utilisés pour acheminer le signal soit vers un résonateur optique 42, soit vers une sortie, et non pas entre les résonateurs optiques 42.

Il y a cependant des variantes : par exemple on pourrait avoir plusieurs signaux S en entrée, acheminés par des guides d'ondes différents. A noter aussi que seulement une fraction de résonateurs (de préférence ceux qui sont sur le bord de la matrice) sont couplés à des guides d'ondes.

Chaque résonateur optique 42 (dénnoté par l'index m) a une fréquence optique de résonance ν_m correspondant au mode résonant dont l'amplitude est proportionnelle à la variable α_m . Nous ne considérons qu'un mode de ce résonateur optique 42. De préférence, les autres modes du résonateur optique 42 sont plus espacés que la largeur de bande BW du signal considéré. De préférence, l'espacement des fréquences des modes dans le même résonateur (ISL) est plus grand que la largeur de bande BW du signal considéré.

Les résonateurs optiques 42 sont directement couplés les uns aux autres en fonction de leur proximité spatiale avec un taux de couplage mutuel μ (figure 2, sous figure

a). En particulier, l'espacement entre les résonateurs optiques 42 est inférieur à la longueur d'onde du signal optique considéré. A noter que dans ces résonateurs les modes sont deux fois dégénérés, car à la même fréquence correspondent deux modes selon le sens de propagation. Les flèches montrent la direction des modes qui sont couplés. A noter que l'architecture tient compte du sens de propagation de la lumière dans chaque résonateur, en particulier en ce qui concerne la disposition des guides d'ondes.

Les sous figure 2a et 2b montrent le couplage entre les résonateurs optiques 42, réalisé de manière évanescente, c'est-à-dire que le champ optique s'étend sur plusieurs résonateurs optiques 42, formant ainsi des « supermodes ». Le flux d'énergie d'un résonateur à l'autre peut être considéré comme un "saut" avec un retard $T_d = 1/\mu$, donc inversement proportionnel au taux de couplage mutuel μ entre les résonateurs optiques 42. Ce délai est également lié à l'échelle de temps à laquelle le champ optique change à l'intérieur de chaque résonateur, c'est-à-dire à la largeur de bande optique. Celle-ci peut être exprimée par un produit retard-largeur de bande (chiffre sans dimension lié à la "mémoire" du système). Par exemple, dans un seul résonateur, ce produit est égal à 1. Dans un système de résonateurs, il peut être supérieur à 1.

Les résonateurs optiques 42 peuvent être réalisés avec des cristaux photoniques [D. Dodane, et al. "Fully embedded photonic crystal cavity with Q= 0.6 million fabricated within a full-process CMOS multiproject wafer." Optics express 26.16 (2018): 20868-20877.]

Ce type de résonateurs est représenté par des carrés (figure 2b,c) et les modes ne sont pas dégénérés. Il est utile, dans certains cas, de coupler ces résonateurs par un très court guide d'ondes (figure 2c).

Dans un exemple, les résonateurs optiques 42 ont une réponse non-linéaire de sorte que la fréquence optique de résonance ν de chaque résonateur optique 42 dépend de l'énergie E stockée dans le résonateur optique 42. La fréquence ν est, par exemple, donnée par l'équation suivante (on omet l'index m par souci de bréveté) :

$$\nu = \nu_0 + \beta \cdot E \quad (3)$$

Où :

- ν_0 est la fréquence du résonateur à la limite d'une très faible excitation optique,
- β représente la force de l'effet non linéaire, et
- E est l'énergie dans le résonateur.

Le changement de fréquence est représenté par un nombre complexe, ce qui signifie que β est aussi une constante complexe. Physiquement, l'effet décrit est soit un décalage de fréquence, soit un changement de la largeur de raie (augmentation des pertes

par absorption), soit les deux. Par faible excitation on entend que le décalage spectral ou l'élargissement spectral est comparable à la largeur de la résonance $\Delta\nu = \nu_0/Q$ du résonateur optique 42, Q étant le facteur de surtension.

De préférence, tous les résonateurs optiques 42 sont identiques. Ils ont donc dans ce cas la même fréquence de résonance (dans les limites des tolérances de fabrication). En variante, au moins un résonateur optique 42 est différent des autres résonateurs optiques 42.

De préférence, le circuit réservoir 24 est réalisé sous la forme d'un circuit photonique intégré. Le circuit photonique intégré comprend par exemple au moins l'un des matériaux suivants : le silicium, le nitrure de silicium, l'oxyde riche en silicium, l'alliage III-V de semi-conducteur sur isolant et le niobate de lithium.

Dans une variante, il est possible de contrôler de manière dynamique la fréquence ν_0 de chaque résonateur 42 par effet thermo optique, électro-optique ou piézo-optique. La mise en œuvre dépend de la fonderie photonique choisie et en tout cas est une fonction proposée par celle-ci. Ainsi, à une partie ou à tous les résonateurs 42 seront associés des terminaux électriques, tel que le changement de fréquence $\Delta\nu_{dyn} \propto I$ ou V est proportionnel à un courant ou à une tension. Typiquement le terminal de masse est commun, ce qui réduit le nombre de terminaux à $N_{terminaux} \leq M + 1$.

Le second circuit optique 26 d'amplification et de filtrage est connecté entre le circuit réservoir 24 et le circuit de lecture 28. Le second circuit optique 26 est propre à amplifier et filtrer le signal converti U pour obtenir un second signal intermédiaire $\tilde{U}$.

Dans un exemple d'implémentation illustré par la figure 1, le second circuit optique 26 comprend un module d'amplification 44 avec un gain G et un module de filtrage 46 (filtre passe-bas par exemple).

Lorsque l'architecture 10 est dépourvue de second circuit optique 26, le second signal intermédiaire $\tilde{U}$ est le signal converti U.

Le circuit de lecture 28 est propre à réaliser la fonction lecture du calcul par réservoir. Le circuit de lecture 28 a, ainsi, été préalablement entraîné pour lire l'état du circuit réservoir 24 selon le principe du calcul par réservoir.

De préférence, le circuit de lecture 28 est réalisé sous la forme d'un circuit photonique intégré. Le circuit photonique intégré comprend par exemple au moins l'un des matériaux suivants : le silicium, le nitrure de silicium, l'oxyde riche en silicium, l'alliage III-V de semi-conducteur sur isolant et le niobate de lithium. Le circuit de lecture 28 est propre à recevoir le second signal intermédiaire $\tilde{U}$ et à générer le signal optique de sortie O en fonction du second signal intermédiaire $\tilde{U}$.

Dans un exemple de mise en œuvre, le signal optique de sortie O est obtenu par une somme cohérente des champs optiques dans les résonateurs optiques 42 du circuit réservoir 24. En d'autres termes, le signal optique de sortie O est obtenu directement sur la base des champs optiques, sans passer par les intensités de ces champs (ce qui aurait nécessité la présence d'un détecteur). Plus précisément, le circuit de lecture 28 est propre à effectuer une somme pondérée des composantes du signal intermédiaire $\tilde{U}$ (matrice) pour générer le signal optique de sortie O.

Mathématiquement, le circuit de lecture 28 réalise la fonction $O = W_{out}U$, où U est la sortie (nous omettons le signe tilde par brévit ) et O représente le champ sortant du circuit (par des guides d'ondes) tel que :

$$E_{wg}(\vec{r}, t) = O(t)\psi_{wg}(\vec{r}) \quad (4)$$

et W_{out} est une matrice M vers 2 par exemple (donc O est un vecteur de dimension 2 repr santant deux sorties, ou deux modes dans le même guide d'onde). Ceci est diff rent d'un circuit de lecture par somme incohérente, où le signal en sortie est dans le domaine électrique et s'écrit $O_{elect}(t) = \sum_m c_m |U_m|^2$ et il n'est que la somme de composantes positives.

De préférence, comme illustré par l'exemple de la figure 3, le circuit de lecture 28 comprend des sorties additionnelles pour des signaux additionnels $U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$. Les signaux additionnels $U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$ sont obtenus par le circuit de lecture 28 en même temps que les sorties O. Par exemple, la figure 4 montre un schéma de circuit photonique réalisant la transformation décrite par l'équation 4. Les sorties additionnelles sont obtenues à partir des sorties non utilisées des composants α .

Les signaux additionnels $U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$ permettent d'extraire davantage d'informations concernant l' tat U du réservoir 24. Les signaux additionnels $U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$ sont, par exemple, utilisés pour mettre en œuvre des actions de contrôle de l'architecture 10, par exemple des actions visant à régler des paramètres du premier circuit optique 22 et/ou du circuit réservoir 24 et/ou du second circuit optique 26.

Un exemple de mise en œuvre du circuit de lecture 28 est décrit dans la demande WO 2017/144895.

Dans un exemple d'implémentation illustré par la figure 4, le circuit de lecture 28 comprend N (ou N-1) modulateurs de phase 50 et N-1 séparateurs variables 52 connectés aux N (ou N-1) modulateurs de phase 50. Les modulateurs de phase 50 et les séparateurs variables sont par exemple réalisés en technologie photonique sur silicium, niobate de lithium en couche mince sur oxyde [D. Zhu, et al., "Integrated photonics on thin-film lithium niobate," Adv. Opt. Photon. 13, 242-352 (2021) ; Qi, Yifan and Li, Yang. "Integrated lithium

niobate photonics" Nanophotonics, vol. 9, no. 6, 2020, pp. 1287-1320]. Les différents composants sont réalisés dans la même puce photonique et reliés par des guides d'ondes, représentés par des lignes dans la figure 4.

La figure 5 illustre la définition d'un modulateur de phase au travers de l'opération effectuée sur le champ électrique E. Les modulateurs de phase en optique intégrée exploitent l'effet électro-optique, piézo-électrique, thermo-optique. Dans les semiconducteurs (silicium, phosphore d'indium) la modulation de la densité des porteurs libres est aussi exploitée. La référence [Zhu2021, cité] décrit la réalisation de modulateurs de phase en niobate de lithium. La réalisation de modulateurs de phase dans les autres plateformes est décrite précédemment.

La figure 6 illustre un exemple d'un séparateur variable 52. Dans cet exemple, chaque séparateur variable 52 est mis en œuvre au moyen de deux modulateurs de phase 60 dans un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI).

En particulier, l'implémentation du circuit de lecture 28, comme présenté dans les figures 5 et 6, permet de minimiser le nombre de composants optiques utilisés, soit $2N-1$, où N représente le nombre de sorties utilisées. D'ailleurs, un des modulateurs de phase 50 peut être omis, le nombre total de composants devient $2(N-1)$. D'autres configurations sont possibles, par exemple par une chaîne de MZI en mode « push-pull » [Po Dong et al., "High-speed low-voltage single-drive push-pull silicon Mach-Zehnder modulators," Opt. Express 20, 6163-6169 (2012)]. Il est important de remarquer que la fonction modulation est utilisée en condition quasi-statique, c'est-à-dire à très basse vitesse. De ce fait, les effets thermo-optiques peuvent convenir dans le mode de réalisation décrit ici [K. Suzuki, et al, "Ultra-high-extinction-ratio 2×2 silicon optical switch with variable splitter," Opt. Express 23, 9086-9092 (2015)]. Le mode de réalisation préféré privilégie une réalisation visant à minimiser la consommation d'énergie et la taille du dispositif, par exemple comme dans le dispositif décrit ici [Z. Han, et al. "High-performance and power-efficient 2×2 optical switch on silicon-on-insulator." Optics Express 23.19 (2015): 24163-24170.].

La sortie 30 de l'architecture 10 est la sortie du circuit de lecture 28. En particulier, dans la phase d'inférence, le signal de sortie O est destiné à être envoyé à l'utilisateur, tandis que durant la phase d'apprentissage, le signal de sortie O et son complémentaire $\bar{O}$ sont envoyés à un détecteur (bloc électronique 32).

Un exemple de configuration de l'architecture 10 va maintenant être décrit. Dans cet exemple, le bloc électronique 32 est utilisé pour entraîner le circuit de lecture 28, c'est-à-dire déterminer les paramètres du circuit de lecture 28 permettant de lire la sortie du circuit réservoir 24.

Dans cet exemple, le bloc électronique 32 comprend un détecteur-récepteur (« receiver » en anglais) 50, un comparateur 52 et un calculateur 54 (par exemple un circuit électronique numérique). Le détecteur-récepteur transforme l'intensité optique en signaux électriques rapides (bande passante >1 GHz) et le numérise. Avantageusement, le détecteur-récepteur 50 est un récepteur optique cohérent, qui détecte à la fois l'amplitude et la phase d'un signal optique et les numérise.

Dans cet exemple, le signal de sortie O (dans un intervalle temporel T) est envoyé au détecteur-récepteur 50. La comparaison entre le signal attendu Y_{expect} et le signal obtenu se fait dans le domaine numérique (par le calculateur 54) et le résultat est l'erreur ϵ . Dans ce cas, le bloc 52 est inclus dans le calculateur 54.

Il est aussi possible de réaliser le calcul de l'erreur dans le domaine électrique analogique. Dans ce cas, le détecteur 50 convertit le signal de sortie O (signal optique) dans le domaine électrique et l'envoie, en même temps que le signal attendu Y_{expect} , à un circuit électronique comparateur-intégrateur générant un signal d'erreur ϵ .

Le signal d'erreur ϵ est ensuite envoyé au calculateur 54 pour optimiser les paramètres du premier circuit optique 22 (gain G), du circuit réservoir 24, du second circuit optique 26 (gain G) et du circuit de lecture 28 (matrice M).

Dans un exemple, dans la phase d'entraînement, la procédure réalise un algorithme de minimisation d'erreur de type itératif et consiste en ceci :

- 1 L'erreur $\epsilon(i)$ est mesurée pour la réponse $O(i)$ au signal $S(i)$, i indiquant une réalisation du signal dans l'intervalle T_i .
- 2 le calculateur 54 modifie les paramètres W_{out} dans le circuit de lecture 28 en fonction du signal d'erreur $\epsilon(i)$, et dans le but de minimiser le signal d'erreur ϵ . Par exemple, on calcule les nouveaux paramètres selon l'algorithme de la descente la plus rapide.
- 3 Les étapes 1 et 2 sont répétées avec des nouvelles réalisations des signaux S.
- 4 Les étapes 1,2,3 sont répétées mais cette fois dans le but d'optimiser les paramètres du circuit réservoir 24 et la valeur du gain G.
- 5 Les signaux auxiliaires D sont obtenus par détection directe des sorties auxiliaires $U_x = VU$ par des photodiodes intégrées à basse fréquence (<1 GHz). Ces signaux sont utilisés par le calculateur 54 afin de stabiliser le point de fonctionnement du circuit réservoir 24. Par exemple on peut fixer comme consigne le maintien du niveau de puissance moyenne dans chaque sortie auxiliaire U_x . Cette fonction est utile aussi en phase d'inférence.

Un exemple de fonctionnement de l'architecture 10 en phase d'inférence va maintenant être décrit (phase d'inférence).

L'entrée 20 reçoit un signal optique d'entrée S.

Optionnellement, le signal optique d'entrée S est amplifié et filtré par le premier
5 circuit optique 22 pour obtenir le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$.

Le premier signal intermédiaire $\tilde{S}$ est reçu par le circuit réservoir 24 et est converti en un signal converti U.

Optionnellement, le signal converti U est amplifié et filtré par le second circuit optique 26 pour obtenir le second signal intermédiaire $\tilde{U}$.

10 Le second signal intermédiaire $\tilde{U}$ est reçu par le circuit de lecture 28 qui génère le signal optique de sortie O.

Ainsi, l'architecture 10 est entièrement réalisée de sorte que lors de la phase d'inférence, aucun circuit numérique/électronique ne soit utilisé pour convertir les signaux optiques. De ce fait, le signal se propageant entre l'entrée 20 et la sortie 30 de
15 l'architecture 10 est uniquement un signal optique, sans conversion dans le domaine électrique ou numérique.

De ce fait, dans la phase d'inférence, la consommation d'énergie est essentiellement liée à 1) l'amplification des signaux dans les circuits 22 et 26, 2) le maintien de la configuration dans le circuit réservoir 24 et dans le circuit de lecture 28 ; le calculateur
20 54. Cette consommation est relativement indépendante de la bande passante du signal optique, lorsque dans les algorithmes numériques celle-ci est une fonction fortement croissante de la bande passante (du débit).

Si les modulateurs de phase 50 et les diviseurs de puissance 52 exploitent l'effet piézo-électrique ou électro-optique, leur consommation peut être extrêmement faible.

25 Un autre avantage du fonctionnement tout-optique en mode « inférence » est que le circuit peut être facilement reconfiguré pour effectuer des tâches différentes : correction de la distorsion des signaux télécoms codés selon des formats de modulation et débits différents. La même architecture 10 peut aussi être utilisée pour prédire l'évolution future d'un signal optique généré par un système complexe, par exemple chaotique.

30 L'absence des lignes à retard dans le circuit réservoir 24 permet une réduction drastique de l'encombrement de cette partie de l'architecture 10. Dans l'état de l'art antérieur, un réservoir de 16 nœuds requiert un circuit de 16 mm² [K. Vandoorne, et al. "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip." Nature communications 5.1 (2014): 3541.], c'est-à-dire 3 ordres de grandeurs supérieur à
35 l'encombrement du réservoir 24 dans la même technologie photonique (silicium sur oxyde).

Cela permet d'augmenter de manière considérable le nombre de « neurones » du réservoir. Afin d'exploiter cet avantage et le traduire en puissance de calcul, un nombre plus grand de sorties du réservoir doit être utilisé. La limite au nombre de sorties U est donnée par la complexité du circuit de lecture 28. Il est possible de considérer un circuit de lecture
5 également réalisé avec des résonateurs comme par exemple dans la référence [Dan Yi, et al., « Multi-functional photonic processors using coherent network of micro-ring resonators ». APL Photonics 6, 100801 (2021).].

De ce fait, l'architecture 10 présente un encombrement très réduit (de plusieurs ordres de grandeurs si le circuit de lecture est aussi réalisé avec des résonateurs) et des
10 pertes réduites par rapport aux systèmes de l'état de la technique utilisant des lignes à retard.

L'homme du métier comprendra que les modes de réalisation et variantes de la description peuvent être combinés pourvu qu'ils soient compatibles techniquement.

REVENDICATIONS

- 5 1. Architecture (10) de circuits photoniques pour un calcul analogique par réservoir, l'architecture (10) comprenant :
- une entrée (20) pour un signal optique d'entrée (S),
 - un circuit réservoir (24) propre à recevoir un premier signal intermédiaire ($\tilde{S}$) dépendant du signal optique d'entrée (S) et à convertir le premier signal intermédiaire ($\tilde{S}$) en un signal converti (U), le circuit réservoir (24) étant formé
 - 10 de résonateurs optiques (42) couplés, le circuit réservoir (24) étant dépourvu de lignes à retard entre les résonateurs optiques (42),
 - un circuit de lecture (28) propre à recevoir un second signal intermédiaire ($\tilde{U}$) dépendant du signal converti (U) et à générer un signal optique de sortie (O) en fonction du second signal intermédiaire ($\tilde{U}$), et
 - 15 - une sortie pour le signal optique de sortie (O).
- 20 2. Architecture (10) selon la revendication 1, dans lequel chaque résonateur optique (42) est directement couplé à ses proches voisins avec un taux de couplage (μ) et/ou à un guide d'onde (44) avec un taux de couplage (κ).
- 25 3. Architecture (10) selon la revendication 2, dans lequel chaque résonateur optique (42) a une fréquence optique de résonance (ν) correspondant au mode résonant, les résonateurs optiques (42) ayant une réponse non-linéaire de sorte que la fréquence optique de résonance (ν) de chaque résonateur optique (42)
- 30 dépend de l'énergie stockée dans ce même résonateur optique (42).
4. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le signal se propageant entre l'entrée (20) et la sortie de l'architecture (10) est uniquement un signal optique, sans conversion dans le domaine électrique.
5. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le circuit réservoir (24) et le circuit de lecture (28) sont chacun réalisés sous la forme d'un circuit photonique intégré.

6. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le signal optique de sortie (O) est une somme cohérente des champs optiques dans les résonateurs optiques (42) du circuit réservoir (24).

5 7. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le circuit de lecture (28) comprend des sorties additionnelles pour des signaux additionnels ($U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$), les signaux additionnels ($U_{x1}, \dots, U_{xN-2}$) étant obtenus par le circuit de lecture (28) en fonction du second signal intermédiaire ($\tilde{U}$).

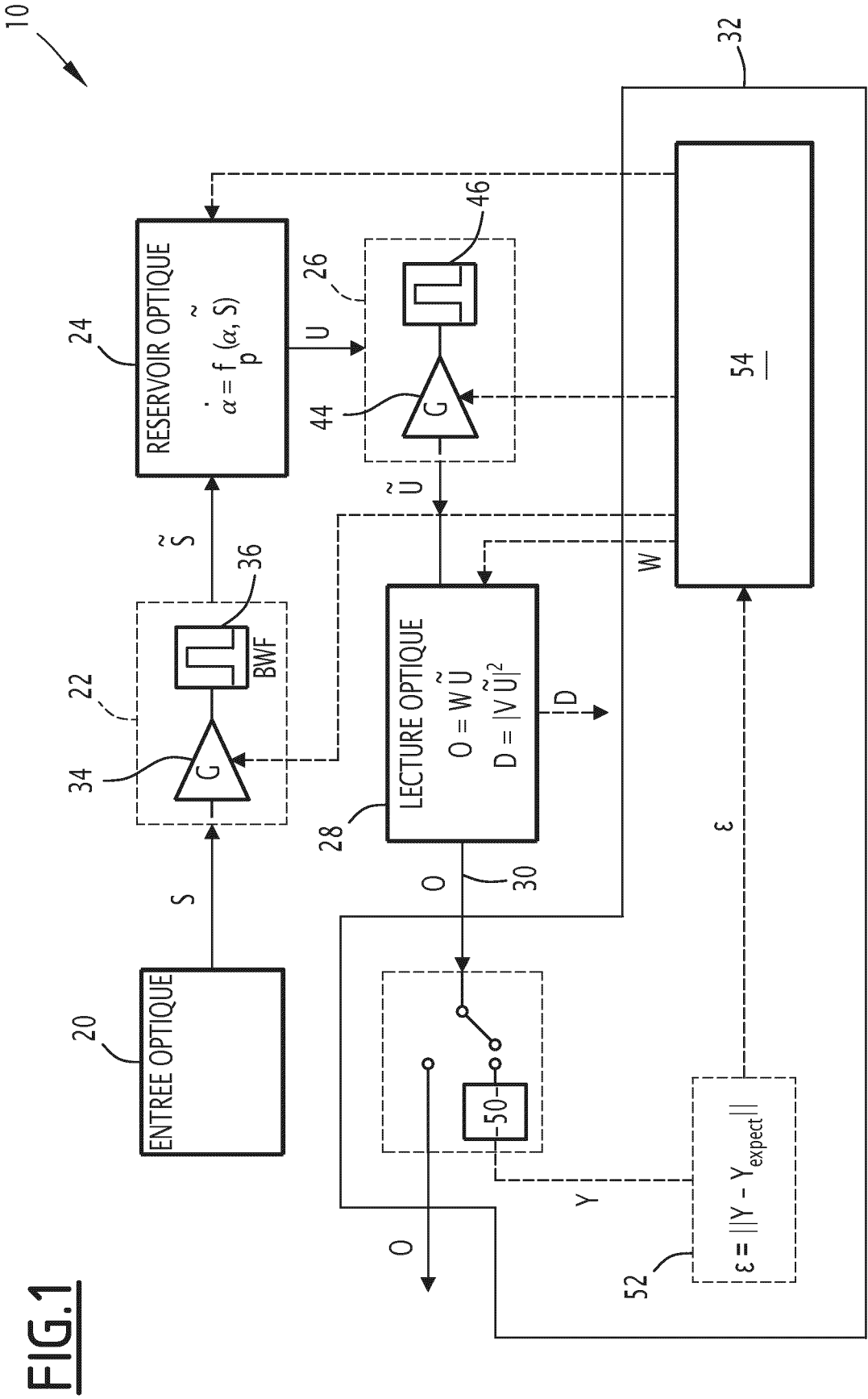
10 8. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le circuit de lecture (28) comprend N ou N-1 modulateurs de phase (50) et N-1 séparateurs variables (52) connectés aux modulateurs de phase (50).

15 9. Architecture (10) selon la revendication 8, dans lequel chaque séparateur variable (52) est mis en œuvre au moyen de deux modulateurs de phase (60) dans un interféromètre de Mach-Zehnder.

20 10. Architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel l'architecture (10) comprend :

- un premier circuit optique (22) d'amplification et de filtrage connecté entre l'entrée (20) et le circuit réservoir (24), le premier circuit optique (22) étant propre à générer le premier signal intermédiaire ($\tilde{S}$) à partir du signal optique d'entrée (S), et
- 25 - un second circuit optique (26) d'amplification et de filtrage connecté entre le circuit réservoir (24) et le circuit de lecture (28), le second circuit optique (26) étant propre à générer le second signal intermédiaire ($\tilde{U}$) à partir du signal converti (U).

30 11. Procédé de filtrage non-linéaire d'un signal optique mis en œuvre par une architecture (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.



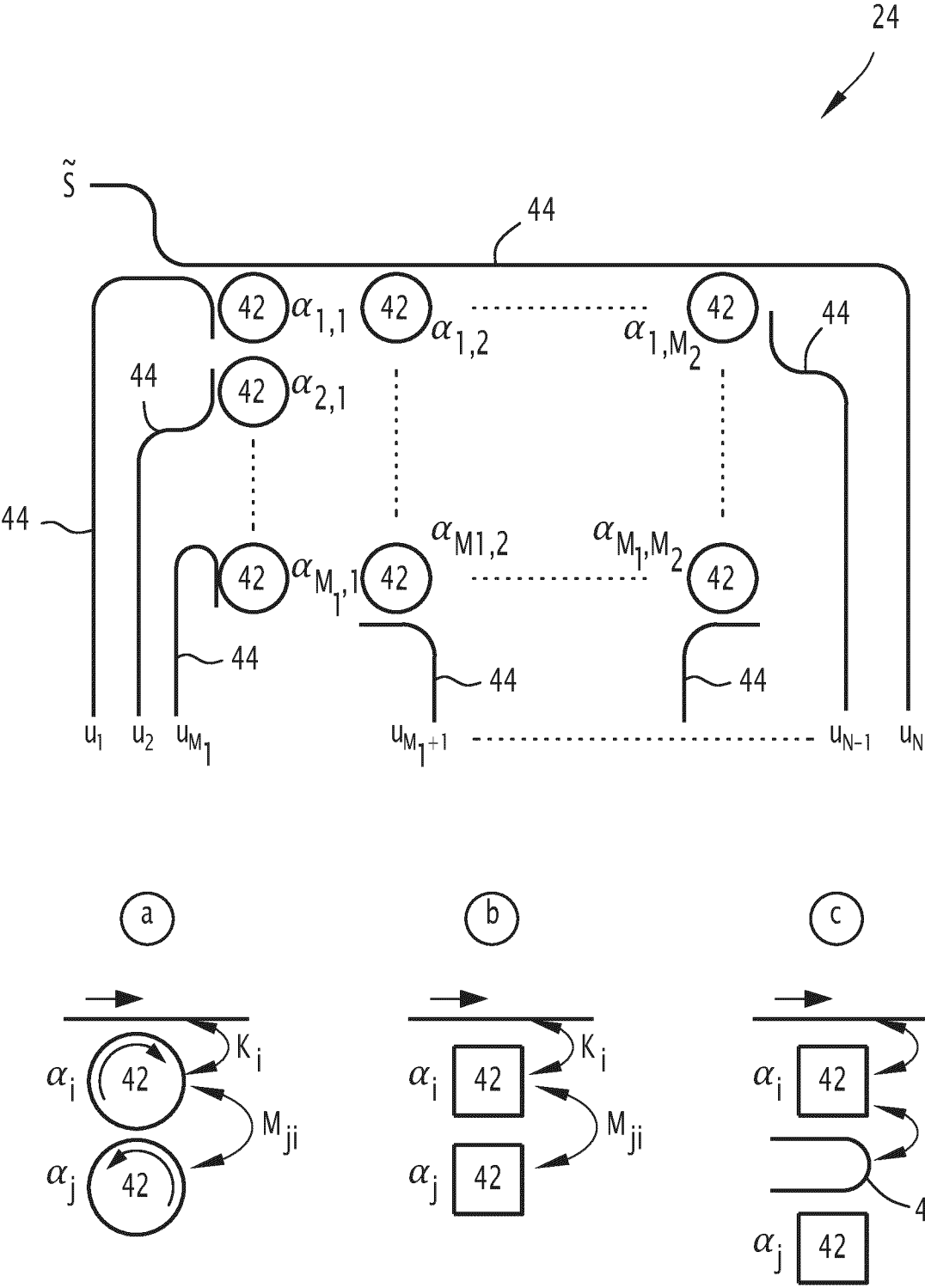


FIG.2

3/6

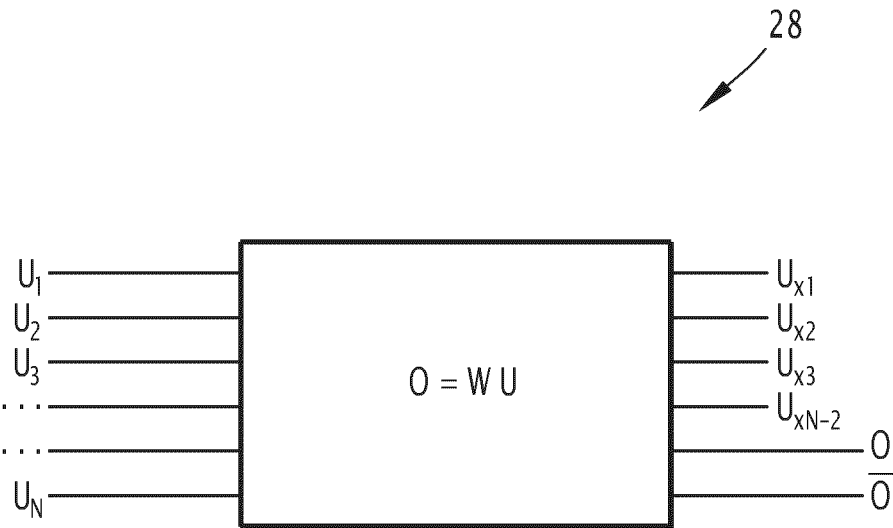


FIG.3

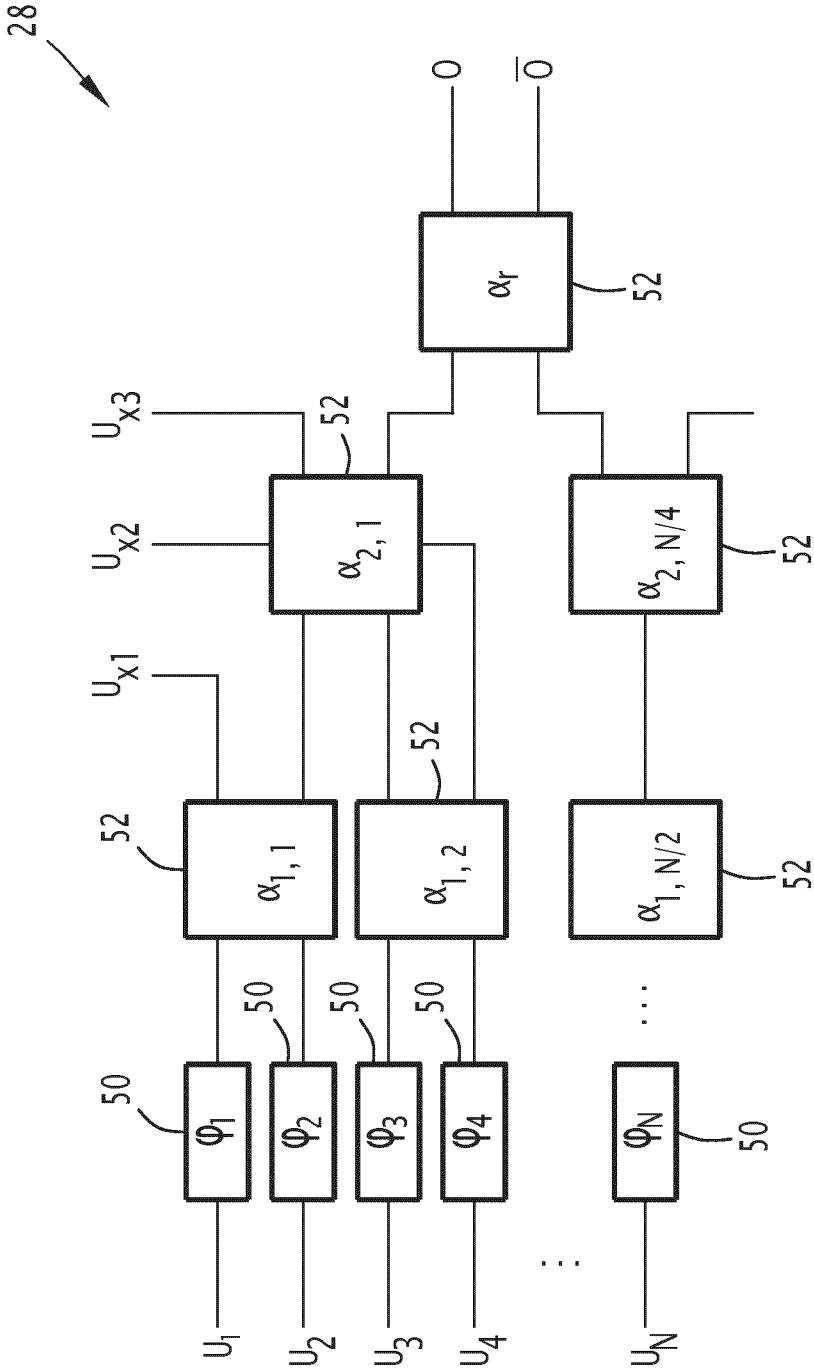
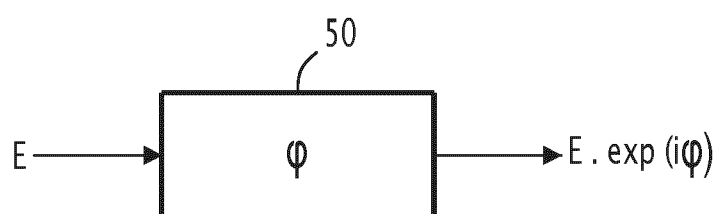


FIG.4

5/6

FIG.5

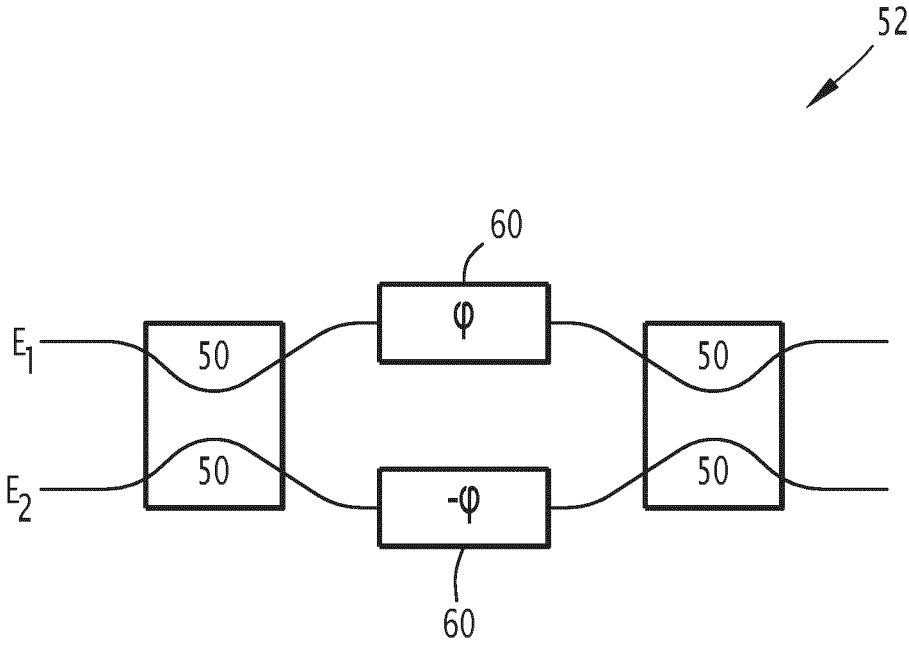


FIG.6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/066670

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G06N 3/044 (2023.01)i; G06N 3/067 (2006.01)i; G06E 3/00 (2006.01)i; G06N 3/049 (2023.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06N; G06E Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	FLORIAN DENIS-LE COARER ET AL. "All-Optical Reservoir Computing on a Photonic Chip Using Silicon-Based Ring Resonators" <i>IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS</i> , USA, Vol. 24, No. 6, 15 May 2018 (2018-05-15), pages 1-8 DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2836985 ISSN: 1077-260X, XP055496601 the whole document	1-11
X	CHARIS MESARITAKIS ET AL. "Micro ring resonators as building blocks for an all-optical high-speed reservoir-computing bit-pattern-recognition system" <i>JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B</i> , US, Vol. 30, No. 11, 01 November 2013 (2013-11-01), page 3048 DOI: 10.1364/JOSAB.30.003048 ISSN: 0740-3224, XP055425985 the whole document	1-11
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 15 August 2024		Date of mailing of the international search report 10 September 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Moro Pérez, Gonzalo Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/066670

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KRISTOF VANDOORNE ET AL. "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip" <i>NATURE COMMUNICATIONS</i> , UK, Vol. 5, 24 March 2014 (2014-03-24), DOI: 10.1038/ncomms4541 ISSN: 2041-1723, XP055255957 page 1 - page 3	1-11
A	SACKESYN STIJN ET AL. "Experimental realization of integrated photonic reservoir computing for nonlinear fiber distortion compensation" <i>OPTICS EXPRESS</i> , US, Vol. 29, No. 20, 13 September 2021 (2021-09-13), page 30991 DOI: 10.1364/OE.435013 ISSN: 1094-4087, XP093131154 Abstract, 1. Introduction, 2. Photonic reservoir design, 3. Experimental setup	1-11
A	DE MARINIS LORENZO ET AL. "Photonic Neural Networks: A Survey" <i>IEEE ACCESS</i> , Vol. 7, 12 December 2019 (2019-12-12), pages 175827-175841 DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2957245 XP011761115 Abstract, I. Introduction, II. Photonic neuromorphic computing, III. Literature review	1-11

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06N3/044 G06N3/067 G06E3/00 G06N3/049 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06N G06E		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	FLORIAN DENIS-LE COARER ET AL: "All-Optical Reservoir Computing on a Photonic Chip Using Silicon-Based Ring Resonators", IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, vol. 24, no. 6, 15 mai 2018 (2018-05-15), pages 1-8, XP055496601, USA ISSN: 1077-260X, DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2836985 le document en entier ----- - / - -	1 - 11
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 15 août 2024		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 10/09/2024
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Moro Pérez, Gonzalo

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	CHARIS MESARITAKIS ET AL: "Micro ring resonators as building blocks for an all-optical high-speed reservoir-computing bit-pattern-recognition system", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B., vol. 30, no. 11, 1 novembre 2013 (2013-11-01), page 3048, XP055425985, US ISSN: 0740-3224, DOI: 10.1364/JOSAB.30.003048 le document en entier -----	1 - 11
A	KRISTOF VANDOORNE ET AL: "Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip", NATURE COMMUNICATIONS, vol. 5, 24 mars 2014 (2014-03-24), XP055255957, UK ISSN: 2041-1723, DOI: 10.1038/ncomms4541 page 1 - page 3 -----	1 - 11
A	SACKESYN STIJN ET AL: "Experimental realization of integrated photonic reservoir computing for nonlinear fiber distortion compensation", OPTICS EXPRESS, vol. 29, no. 20, 13 septembre 2021 (2021-09-13), page 30991, XP093131154, US ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.435013 Abstract, 1. Introduction, 2. Photonic reservoir design, 3. Experimental setup -----	1 - 11
A	DE MARINIS LORENZO ET AL: "Photonic Neural Networks: A Survey", IEEE ACCESS, vol. 7, 12 décembre 2019 (2019-12-12), pages 175827-175841, XP011761115, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2957245 Abstract, I. Introduction, II. Photonic neuromorphic computing, III. Literature review -----	1 - 11