

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 02.08.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 09.02.24 Bulletin 24/06.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : THALES Société anonyme — FR,
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Établissement public à caractère scientifique et technique —
FR, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY Établissement public natio-
nal à caractère scientifique, culturel et professionnel — FR et
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Établissement public à caractère industriel et commercial —
FR.

72 Inventeur(s) : BORTOLOTTI Paolo, ANANE
Abdelmadjid, CROS Vincent, KIM Joo-Von, DE
LOUBENS Grégoire et DE ROSSI Alfredo.

73 Titulaire(s) : THALES Société anonyme, CENTRE NATIONAL DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Établissement public à caractère
scientifique et technique, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY Établissement
public national à caractère scientifique, culturel et professionnel, Com-
missariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives Établis-
sement public à caractère industriel et commercial.

74 Mandataire(s) : Lavoix.

54 Circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones et procédé de réalisation et
d'inférence associés.

57 Circuit neuromorphique réalisant physiquement un ré-
seau de neurones et procédé de réalisation et d'inférence
associés

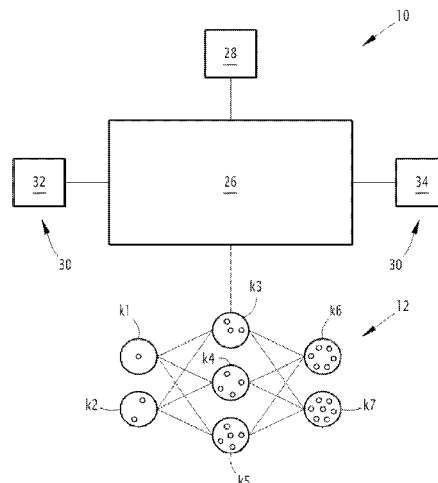
L'invention concerne un circuit neuromorphique (10)
réalisant physiquement un réseau de neurones. Le circuit
neuromorphique (10) comprend :

- au moins un composant (26) propre à être excité selon
une pluralité de modes d'excitation propres avec une popu-
lation respective, et à présenter plusieurs configurations
d'excitation,

- une unité de configuration (28) du composant (26)
propre à exciter le composant (26) pour obtenir une confi-
guration d'excitation choisie en fonction d'une architecture
souhaitée de réseau de neurones, et

- une unité d'interrogation (30) du composant (26)
propre à modifier sélectivement les populations de premiers
modes d'excitation propres et à mesurer les populations de
deuxièmes modes d'excitation propres, les premiers et deu-
xièmes modes d'excitation propres étant respectivement les
modes d'excitation des neurones d'entrée et des neurones
de sortie de l'architecture souhaitée.

Figure pour l'abrégé : figure 1



Description

Titre de l'invention : Circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones et procédé de réalisation et d'inférence associés

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne un circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones. Elle se rapporte aussi à un procédé de réalisation et d'inférence associés.

ARRIERE-PLAN DE L'INVENTION

[0002] Le développement de l'internet et des capteurs connectés conduit à permettre l'obtention de quantités considérables de données. Ce phénomène souvent désigné sous le terme de « *big data* » implique l'emploi d'ordinateurs pour pouvoir exploiter l'ensemble des données obtenues. Une telle exploitation peut être utilisée dans de multiples domaines, parmi lesquelles le traitement automatique de données, l'aide au diagnostic, l'analyse prédictive, les véhicules autonomes, la bioinformatique ou la surveillance.

[0003] Pour mettre en œuvre une telle exploitation, il est connu d'utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique faisant partie de programmes pouvant être exécutés sur des processeurs tels que les CPU ou les GPU. Un CPU est un processeur, le sigle CPU provenant du terme anglais « *Central Processing Unit* » signifiant littéralement unité centrale de traitement tandis qu'un GPU est un processeur graphique, le sigle GPU provenant du terme anglais « *Graphics Processing Unit* » signifiant littéralement unité graphique de traitement.

[0004] Parmi les techniques de mise en œuvre d'apprentissage, l'emploi de réseaux de neurones formels, et notamment de réseaux de neurones profonds, est de plus en plus répandu, ces structures étant considérées comme très prometteuses du fait de leurs performances pour de nombreuses tâches telles que la classification automatique de données, la reconnaissance de motifs, la traduction et la compréhension automatique de langues, le contrôle robotique, la navigation automatique, les systèmes de recommandations, la détection d'anomalies, la détection de fraudes, l'étude de l'ADN ou encore la découverte de nouvelles molécules.

[0005] Un réseau de neurones est en général composé d'une succession de couches de neurones dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la couche précédente. Plus précisément, chaque couche comprend des neurones prenant leurs entrées sur les sorties des neurones de la couche précédente. Chaque couche est reliée par une pluralité de synapses. Un poids synaptique est associé à chaque synapse. C'est un

nombre réel, qui prend des valeurs positives comme négatives. Pour chaque couche, l'entrée d'un neurone est la somme pondérée des sorties des neurones de la couche précédente, la pondération étant faite par les poids synaptiques.

- [0006] Pour une implémentation dans un CPU ou un GPU, une problématique de goulot d'étranglement de Von Neumann (également appelée « *Von Neumann bottleneck* » selon sa dénomination anglaise) apparaît du fait que l'implémentation d'un réseau de neurones profond (à plus de trois couches et allant jusqu'à plusieurs dizaines) implique d'utiliser à la fois la ou les mémoires et le processeur alors que ces derniers éléments sont séparés spatialement. Il en résulte un engorgement du bus de communication entre la ou les mémoires et le processeur à la fois pendant que le réseau de neurones une fois entraîné est utilisé pour réaliser une tâche, et, à plus forte raison, pendant que le réseau de neurones est entraîné, c'est-à-dire pendant que ses poids synaptiques sont réglés pour résoudre la tâche en question avec un maximum de performance.
- [0007] Il est donc souhaitable de développer des architectures matérielles dédiées, entremêlant mémoire et calcul, pour réaliser des réseaux de neurones rapides, faible consommation et capables d'apprendre en temps réel.
- [0008] Il est connu de réaliser des réseaux de neurones sur la base d'une technologie de type CMOS. Il est entendu par le sigle « CMOS », oxyde métallique semi-conducteur complémentaire (acronyme provenant de l'expression anglaise « Complementary Metal-Oxide-Semiconductor »). Le sigle CMOS désigne aussi bien un procédé de fabrication qu'un composant obtenu par un tel procédé de fabrication.
- [0009] Il est également connu un réseau de neurones reposant sur des technologies de type optique.
- [0010] Plus précisément, trois propositions d'architecture font l'objet d'études spécifiques : les réseaux à neurones CMOS et synapses CMOS, les réseaux à neurones optiques et synapses optiques et les réseaux à neurones CMOS et synapses memristives. Des synapses memristives sont des synapses utilisant des memristors. En électronique, le memristor (ou memristance) est un composant électronique passif. Le nom est un mot-valise formé à partir des deux mots anglais memory et resistor. Un memristor est un composant de mémoire non-volatile, la valeur de sa résistance électrique changeant avec l'application d'une tension pendant une certaine durée et restant à cette valeur en l'absence de tension.
- [0011] Toutefois, selon chacune de ces technologies, chaque neurone occupe plusieurs dizaines de micromètres de côté. Pour les technologies CMOS et optique, chaque synapse occupe également plusieurs dizaines de micromètres de côté. Il en résulte que, sur une surface limitée correspondant par exemple à une puce électronique, le nombre de neurones et de synapses qui peuvent être intégrés est limité, ce qui résulte en une diminution des performances du réseau de neurones.

- [0012] Pour les réseaux de neurones impulsionnels, aux problématiques précitées, s'ajoute aussi la difficulté à implémenter un entraînement puisque la technique de rétropropagation du gradient qui est la plus efficace actuellement n'est pas directement utilisable.
- [0013] Pour entraîner les réseaux de neurones impulsionnels, il est connu d'utiliser un principe dérivé de la règle d'Hebb selon lequel deux neurones ont un lien synaptique plus forts lorsqu'ils émettent des impulsions simultanément. Par exemple, une contrainte est appliquée sur chaque synapse pour que le poids associé soit augmenté si les deux neurones reliés à la synapse ont émis chacun une impulsion avec un intervalle de temps inférieur à un seuil prédéfini ou soit diminué dans le cas contraire.
- [0014] Néanmoins, du fait que cette technique ne résout pas l'optimisation d'une fonction objectif globale, sa précision n'est pas toujours satisfaisante.

Résumé de l'invention

- [0015] Il existe donc un besoin pour un circuit neuromorphique permettant de réaliser un grand nombre de synapses et de neurones et présentant une consommation réduite.
- [0016] A cet effet, la description décrit un circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, le circuit neuromorphique comprenant :
- [0017] - au moins un composant propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée par un couplage respectif,
- [0018] chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones,
- [0019] - une unité de configuration du au moins un composant, l'unité de configuration étant propre à exciter le composant pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction d'une architecture souhaitée de réseau de neurones, l'architecture souhaitée comportant des neurones d'entrée et des neurones de sortie, et
- [0020] - une unité d'interrogation du au moins un composant, l'unité d'interrogation du composant étant propre à modifier sélectivement les populations de premiers modes d'excitation propres et à mesurer les populations de deuxièmes modes d'excitation propres, les premiers modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones d'entrée et les deuxièmes modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones de sortie.
- [0021] Selon des modes de réalisation particuliers, le circuit neuromorphique présente une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les com-

binaisons techniquement possibles :

- [0022] - le composant est propre à être excité dans un régime dans lequel l'amplitude d'un couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres dans chaque configuration d'excitation dépend des populations respectives de chacun des deux modes d'excitation propres ;
- [0023] - l'au moins un composant présente deux régimes, un premier régime dans lequel l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres est indépendante de la population de chacun des deux modes d'excitation propres et un deuxième régime dans lequel l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres dépend de la population de chacun des deux modes d'excitation propres, l'unité de configuration étant propre à exciter le composant dans le deuxième régime ;
- [0024] - l'unité de configuration est propre à exciter les modes d'excitation propres selon une configuration initiale différente de la configuration d'excitation choisie, le composant se relaxant vers la configuration d'excitation choisie ;
- [0025] - l'au moins un composant est une couche en élément ferromagnétique ;
- [0026] - l'élément ferromagnétique est un grenat de fer et d'yttrium ;
- [0027] - l'au moins un composant est choisi dans la liste constituée de : une microstructure magnétique, une cavité, un métamatériau, et un résonateur supraconducteur ;
- [0028] - l'unité de configuration est choisie parmi une unité d'excitation optique, et une unité d'excitation électrique.
- [0029] - l'unité d'interrogation est choisie parmi : une unité d'excitation optique, et une unité d'excitation électrique.
- [0030] La description décrit également un procédé de réalisation physique d'un réseau de neurones présentant une architecture souhaitée, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, le procédé de réalisation physique comprenant :
- [0031] - une étape de configuration d'au moins un composant d'un circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones ayant été configuré, l'au moins un composant étant propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée par un couplage respectif,
- [0032] chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones,
- [0033] l'étape de configuration étant mise en œuvre par une unité de configuration du au moins un composant, l'unité de configuration faisant partie du circuit neuromorphique

et comprenant l'excitation du au moins un composant pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction de l'architecture souhaitée.

- [0034] La description concerne aussi un procédé d'inférence d'un réseau de neurones présentant une architecture souhaitée, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, au moins un composant d'un circuit neuromorphique réalisant physiquement un réseau de neurones ayant été configuré, l'au moins un composant étant propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée par un couplage respectif,
- [0035] chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones,
- [0036] la configuration ayant été mise en œuvre par une unité de configuration du au moins un composant, l'unité de configuration faisant partie du circuit neuromorphique et comprenant l'excitation l'au moins un composant pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction de l'architecture souhaitée,
- [0037] le procédé d'inférence comportant :
- [0038] - une étape de modification sélective des populations de premiers modes d'excitation propres, les premiers modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones d'entrée, l'étape de modification étant mise en œuvre par une unité d'interrogation du circuit neuromorphique, et
- [0039] - une étape de mesure des populations de deuxièmes modes d'excitation propres, les deuxièmes modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones de sortie, l'étape de mesure étant réalisée après atteinte d'un état stable pour l'au moins un composant, l'étape de mesure étant mise en œuvre par l'unité d'interrogation.
- [0040] Dans la présente description, l'expression « propre à » signifie indifféremment « adapté pour », « adapté à » ou « configuré pour ».

Brève description des dessins

- [0041] Des caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :
- [0042] - [Fig.1] la [Fig.1] est une représentation schématique d'un circuit neuromorphique,
- [0043] - [Fig.2] la [Fig.2] est une représentation schématique d'un exemple de réseau de neurones,
- [0044] - [Fig.3] la [Fig.3] est un ordinogramme d'un exemple de mise en œuvre d'un procédé d'inférence utilisant le circuit neuromorphique de la [Fig.1], et

- [0045] - [Fig.4] la [Fig.4] est un exemple de réalisation expérimentale du circuit neuromorphique de la [Fig.1].
- [0046] **DESCRIPTION DETAILLE DE MODES DE REALISATION PREFERES**
- [0047] **CIRCUIT NEUROMORPHIQUE GENERAL**
- [0048] En référence à la [Fig.1], il est décrit un circuit neuromorphique 10.
- [0049] Comme son nom l'indique, le circuit neuromorphique 10 est un circuit réalisant physiquement un réseau de neurones 12.
- [0050] Autrement formulé, le circuit neuromorphique 10 est un circuit physique adapté à réaliser les opérations d'un réseau de neurones 12.
- [0051] En particulier, le circuit neuromorphique 10 est propre à implémenter un réseau de neurones 12 tel que schématisé sur la [Fig.2].
- [0052] Le réseau de neurones 12 décrit est un réseau comportant une succession ordonnée de couches 14 de neurones 16 dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la couche 14 précédente.
- [0053] Par définition, en biologie, un neurone, ou une cellule nerveuse, est une cellule excitable constituant l'unité fonctionnelle de base du système nerveux. Les neurones assurent la transmission d'un signal bioélectrique appelé influx nerveux. Les neurones ont deux propriétés physiologiques : l'excitabilité, c'est-à-dire la capacité de répondre aux stimulations et de convertir celles-ci en impulsions nerveuses, et la conductivité, c'est-à-dire la capacité de transmettre les impulsions. Dans les réseaux de neurones formels, le comportement des neurones biologiques est imité par une fonction mathématique, dite d'activation, qui présente la propriété d'être non-linéaire (pour pouvoir transformer l'entrée de manière utile) et préférentiellement d'être dérivable (pour permettre l'apprentissage par rétropropagation du gradient). Des modèles plus proches du neurone biologique existent, dans lesquels le neurone émet des impulsions (ou des trains d'impulsions) avec une certaine fréquence qui dépend des impulsions entrantes. La fonction d'activation dans ce cas peut être représenté comme une fonction donnant la variation de la fréquence moyenne d'émission d'impulsions avec le courant d'entrée.
- [0054] Plus précisément, chaque couche 14 comprend des neurones 16 prenant leurs entrées sur les sorties des neurones 16 de la couche 14 précédente.
- [0055] Dans le cas de la [Fig.2], le réseau de neurones 12 décrit est un réseau comportant une unique couche cachée de neurones 18. Toutefois, ce nombre de couches cachées de neurones n'est pas limitatif.
- [0056] L'unicité de la couche cachée de neurones 18 signifie que le réseau de neurones 12 comporte une couche d'entrée 20 suivie par la couche cachée de neurones 18, elle-même suivie par une couche de sortie 22.
- [0057] Les couches sont indexables par un indice i entier, la première couche correspondant

à la couche d'entrée 20 et la dernière à la couche de sortie 22.

[0058] Chaque couche 14 est reliée par une pluralité de synapses 24.

[0059] En biologie, la synapse désigne une zone de contact fonctionnelle qui s'établit entre deux neurones 16. Suivant son comportement, la synapse biologique peut exciter ou encore inhiber le neurone aval en réponse au neurone amont. Dans les réseaux de neurones formels, un poids synaptique positif correspond à une synapse excitatrice tandis qu'un poids synaptique négatif correspond à une synapse inhibitrice. Les réseaux de neurones biologiques apprennent par la modification des transmissions synaptiques dans l'ensemble réseau. De même, les réseaux de neurones formels peuvent être entraînés à réaliser des tâches en modifiant les poids synaptiques selon une règle d'apprentissage. Dans le cadre de cette demande, une synapse 24 est un composant réalisant une fonction équivalente à un poids synaptique de valeur modifiable.

[0060] Un poids synaptique est donc associé à chaque synapse 24. A titre d'exemple, c'est un nombre réel, qui prend des valeurs positives comme négatives.

[0061] Pour chaque couche 14, l'entrée d'un neurone 16 est la somme pondérée des sorties des neurones 16 de la couche 14 précédente, la pondération étant faite par les poids synaptiques.

[0062] Selon l'exemple décrit, chaque couche 14 de neurones 16 est entièrement connectée.

[0063] Une couche de neurones entièrement connectée est une couche dans laquelle les neurones de la couche sont chacun connectés à tous les neurones de la couche précédente. Un tel type de couche est plus souvent dénommée selon le terme anglais de « *fully connected* ».

[0064] En l'occurrence, le réseau de neurones 12 est un réseau de neurones à impulsions.

[0065] Un réseau de neurones à impulsions est souvent dénommé par le sigle SNN qui renvoie à la dénomination anglaise de « *Spiking Neural Network* ».

[0066] Dans un tel réseau de neurones impulsif, un neurone est un élément dynamique variant dans le temps tel que décrit plus haut et caractérisé ici par sa fréquence d'émission d'impulsions. Lorsqu'un neurone 16, dit pré-synaptique, en amont, émet une impulsion, la synapse 24 pondère cette impulsion et la transmet au neurone 16, dit post-synaptique, en aval, qui émet éventuellement à son tour une impulsion.

[0067] La stimulation transmise par la synapse 24 est une stimulation d'une partie du neurone 16 en aval, appelée membrane et présentant un potentiel. Si ce potentiel de membrane se charge au-delà d'un seuil dit d'activation, le neurone 16 émet une impulsion.

[0068] Plus précisément, la synapse 24 effectue une multiplication entre le poids et l'activation d'entrée. L'activation d'entrée du neurone 16 en aval est le signal de sortie envoyé par le neurone 16 en amont.

[0069] Le neurone 16 en aval augmente son potentiel de membrane, le compare à un seuil et

émet une impulsion de sortie lorsque le potentiel de membrane excède ce seuil.

- [0070] Dans certains cas, un neurone 16 en amont est activé en permanence (à la façon d'un neurone d'entrée) afin d'ajouter des biais au potentiel de membrane du neurone 16 en aval qui enrichissent l'expressivité de la fonction apprise par le réseau de neurones 12. Un tel neurone 16 est un « neurone de biais ».
- [0071] Le fonctionnement qui vient d'être décrit est valable dans l'autre sens.
- [0072] Plus précisément, dans l'exemple de la [Fig.2], pour toutes les couches 14 de neurones 16, à l'exception de la première couche 20 et des neurones de biais 16, les neurones 16 sont connectés par une synapse 24 qui est bidirectionnelle.
- [0073] De ce fait, le même calcul peut être effectué en échangeant le rôle des deux neurones 16.
- [0074] Comme visible sur la [Fig.1], le circuit neuromorphique 10 comprend un composant 26, une unité de configuration 28 du composant 26 et une unité d'interrogation 30 du composant 26.
- [0075] Dans l'exemple décrit, le composant 26 est unique mais il pourrait être envisagé des configurations où le composant 26 n'est pas unique (voir le paragraphe « autres exemples particuliers »).
- [0076] Le composant 26 peut être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective.
- [0077] Dans l'exemple schématique proposé, il est supposé que le composant 26 présente 7 modes d'excitation.
- [0078] Les modes d'excitation ou états excités sont quantifiés.
- [0079] Cela signifie que les modes d'excitation peuvent être référencés par un entier i , les modes d'excitation étant usuellement classés par énergie croissante.
- [0080] En l'espèce, à titre d'illustration non limitative, il est supposé qu'il existe 7 modes d'excitation et que l'entier i varie entre 1 et 7.
- [0081] L'existence des modes d'excitation permet également de définir un espace réciproque dans lequel les modes d'excitation sont caractérisés par un vecteur propre respectif. De ce fait, dans la suite, chaque mode d'excitation est noté $\mathbf{k}_i$ en référence à son vecteur propre.
- [0082] En outre, la population d'un mode d'excitation $\mathbf{k}_i$ peut être représentée par le potentiel chimique n_i .
- [0083] De ce fait, un mode d'excitation $\mathbf{k}_i$ avec sa population respective pourra être noté $\mathbf{k}_i(n_i)$.
- [0084] Selon l'exemple décrit, le composant 26 présente deux régimes, à savoir un régime linéaire (premier régime) et un régime non-linéaire (deuxième régime).
- [0085] Dans le régime linéaire, l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ est indépendante de la population de chacun des deux

modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$.

- [0086] Ainsi, le peuplement des modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ dans le régime linéaire n'affecte pas l'énergie des modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$. Il en résulte que les modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ peuvent être considérés comme quasi-orthogonaux dans l'espace réciproque.
- [0087] Lorsque le composant 26 est dans le régime linéaire qui peuple ces modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$, cela n'affecte pas leur énergie et les modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ peuvent être considérés comme principalement orthogonaux dans l'espace réciproque. Dans ce régime, le couplage entre modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ est ainsi faible.
- [0088] Par contraste, dans le régime non-linéaire, l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ dépend de la population de chacun des deux modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$.
- [0089] Bien entendu, ce n'est pas limitatif, l'amplitude du couplage peut également être affectée par la population dans un autre mode d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$.
- [0090] Cela correspond à un régime dans lequel le couplage entre les paires de modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ devient significatif, ce qui permet le transfert d'informations d'un mode d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ à un autre mode d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$.
- [0091] Les amplitudes des couplages peuvent être formalisés comme une matrice A de poids dynamiques synaptiques. Chaque élément de la matrice A est un élément a_{ij} où les indices i et j font respectivement référence aux deux modes d'excitation $\mathbf{k}_i$ et $\mathbf{k}_j$. Chaque élément a_{ij} dépend de la population des modes d'excitation $\mathbf{k}_i$ et $\mathbf{k}_j$.
- [0092] Le passage du régime linéaire à un régime non-linéaire s'obtient en augmentant la population des modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$.
- [0093] Le composant 26 décrit présente ainsi plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ excités et leur population respective et correspondant à un fonctionnement dans le régime non-linéaire.
- [0094] Autrement formulé, une configuration d'excitation correspond à un ensemble de valeurs $\mathbf{k}_i(n_i)$ pour toutes les valeurs de i.
- [0095] Cela permet de réaliser un réseau de neurones avec d'une part les modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ et d'autre par les couplages.
- [0096] Chaque mode d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ correspond à un neurone et chaque couplage entre deux modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ correspondant à une synapse entre les deux neurones associés aux deux modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ considérés.
- [0097] Autrement formulé, les neurones du réseau de neurones 12 sont réalisés par les modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ du composant 26 tandis que les synapses sont réalisées par la matrice de couplage non-linéaire des modes d'excitation $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ du composant 26 (matrice A présentée précédemment).
- [0098] Le composant 26 est ainsi un composant programmable pouvant réaliser

l'architecture de nombreux réseaux de neurones.

- [0099] Par l'expression « architecture », il est entendu la structure du réseau de neurones 12, c'est-à-dire en particulier, la position de chaque couche de neurones, le nombre de couches, le nombre de neurones de chaque couche et les liens (synapses) entre chaque neurone.
- [0100] C'est l'unité de configuration 28 du composant 26 qui est propre à programmer le composant 26.
- [0101] L'unité de configuration 28 du composant 26 est propre à exciter le composant 26 pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction d'une architecture souhaitée de réseau de neurones.
- [0102] L'architecture souhaitée est supposée connue, sachant qu'elle peut notamment être obtenue par réalisation d'un entraînement pour une tâche prédéterminée ou choisie par un expert comme particulièrement appropriée pour ladite tâche.
- [0103] L'architecture souhaitée permet de déterminer une matrice A qui correspond à des valeurs de $k_i(n_i)$ pour toutes les valeurs de i , c'est-à-dire une configuration d'excitation.
- [0104] Cela implique que l'unité de configuration 28 est propre à exciter le composant 26 dans le régime non-linéaire.
- [0105] Selon un mode de réalisation particulier, l'unité de configuration 28 du composant 26 est propre à exciter les modes d'excitation propres k_1 à k_7 selon une configuration initiale différente de la configuration d'excitation choisie.
- [0106] Le composant 26 se relaxe alors naturellement vers une configuration d'équilibre, cette configuration d'équilibre étant la configuration d'excitation choisie.
- [0107] De manière plus formalisée, l'unité de configuration 28 réalise une configuration initiale $k_{i0}(n_{i0})$ puis le composant 26 peut se détendre jusqu'à atteindre un quasi-équilibre dynamique correspondant à $k_i(n_i)$ qui est la configuration souhaitée.
- [0108] La configuration initiale est choisie pour être plus simple à obtenir, par exemple parce qu'elle implique de peupler moins de modes d'excitation k_1 à k_7 différents.
- [0109] L'unité d'interrogation 30 sert à interroger le composant 26, c'est-à-dire à envoyer des données d'entrée au réseau de neurones pour obtenir au moins une donnée de sortie.
- [0110] Pour cela, selon l'exemple de la [Fig.1], l'unité d'interrogation 30 comporte deux sous-unités 32 et 34.
- [0111] La première sous-unité 32 est propre à modifier sélectivement les populations de premiers modes d'excitation propres k_1 à k_7 , les premiers modes d'excitation propres k_1 à k_7 étant les modes d'excitation des neurones d'entrées (ceux de la couche d'entrée 20).
- [0112] Cela signifie que la première sous-unité 32 est une sous-unité d'envoi de données d'entrée au composant 26.

- [0113] La deuxième sous-unité 34 est propre à mesurer les populations de deuxièmes modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$, les deuxièmes modes d'excitation propres $\mathbf{k}_1$ à $\mathbf{k}_7$ étant les modes d'excitation des neurones de sortie (ceux de la couche de sortie 22).
- [0114] Cela signifie que la deuxième sous-unité 34 est une sous-unité d'obtention de l'au moins une donnée de sortie du composant 26.
- [0115] Le fonctionnement du circuit neuromorphique 10 est maintenant décrit en référence à la [Fig.3] qui correspond à un ordinogramme d'un exemple de mise en œuvre d'un procédé d'inférence.
- [0116] Ce procédé comporte trois étapes : une étape de configuration 40, une étape de modification E42 et une étape de mesure E44.
- [0117] Lors de l'étape de configuration E40, l'unité de configuration 28 excite le composant 26 pour obtenir une configuration d'excitation choisie.
- [0118] Par exemple, l'unité de configuration 28 reçoit un signal de commande lui indiquant le signal d'excitation à appliquer (par exemple, un signal radiofréquence avec de multiples fréquences comme proposé dans le mode de réalisation du paragraphe suivant).
- [0119] Ce signal d'excitation a été préalablement calculé, par exemple par un outil de simulation, pour permettre de réaliser physiquement une architecture souhaitée de réseau de neurones.
- [0120] Comme expliqué précédemment, ce signal d'excitation peut servir à obtenir une configuration initiale du composant 26 qui viendra se relaxer vers une configuration finale correspondant à l'architecture souhaitée.
- [0121] Lors de l'étape de modification E42, l'unité d'interrogation 30 vient modifier sélectivement des populations de premiers modes d'excitation propres.
- [0122] Cette modification sélective correspond au fait qu'il est souhaité que le réseau de neurones effectue une inférence sur une donnée d'entrée.
- [0123] La donnée d'entrée est convertie en un signal d'excitation par exemple par l'outil de simulation précitée et une unité de commande envoie une commande indiquant à l'unité d'interrogation 30 qu'elle doit envoyer ledit signal d'excitation.
- [0124] Le composant 26 évolue ensuite naturellement jusqu'à atteindre un état stable après une telle excitation.
- [0125] Lors de l'étape de mesure E44, l'unité d'interrogation 30 vient mesurer les populations de deuxièmes modes d'excitation propres.
- [0126] Ainsi, l'unité d'interrogation 30 obtient la donnée de sortie du réseau de neurones, c'est-à-dire sa prédiction pour la donnée d'entrée injectée lors de l'étape de modification E42.
- [0127] Cette donnée de sortie est obtenue en convertissant le signal mesuré par l'unité d'interrogation 30 par l'opération inverse de celle qui a été utilisée pour obtenir le

signal d'excitation pour la donnée d'entrée.

[0128] Il est ainsi réalisé en trois étapes une inférence du réseau de neurones souhaité.

[0129] Bien entendu, il est possible de réaliser ces étapes indépendamment. En particulier, il est possible de mettre en œuvre la réalisation physique du réseau de neurones (étape 40 de configuration) et l'inférence proprement dite (étapes 42 et 44).

[0130] Dans chacun des cas, le présent circuit neuromorphique 10 correspond à une réalisation physique d'un réseau de neurones qui est qualitativement différente de toutes les réalisations physiques connues à ce jour. Au lieu de concevoir et de structurer des éléments non linéaires individuels (neurones) et leurs interconnexions (synapses) dans l'espace réel, il est proposé de réaliser ces éléments dans un espace réciproque de grande dimensionnalité. Pour cela, il suffit de peupler les modes d'excitation propres du composant 26 en présence de fortes non-linéarités pour coupler ces modes d'excitation.

[0131] Ainsi, la connectivité du réseau de neurones 12 peut potentiellement être augmentée de plusieurs ordres de grandeur, puisqu'elle peut utiliser le spectre complet des modes propres dans un système donné. Des valeurs aussi grandes que 10^6 peuvent être obtenues.

[0132] Autrement formulé, la réalisation physique dans l'espace réel de composants reliées par des liaisons physiques n'est ici plus nécessaire pour obtenir un grand nombre de neurones présentant un grand nombre de connexions tout en garantissant une bonne reconfigurabilité des poids synaptiques.

[0133] Le corolaire de cette observation est que le circuit neuromorphique 10 est un circuit neuromorphique plus économe en consommation d'énergie.

[0134] Il convient de noter ici qu'un circuit neuromorphique 10 réalisant des neurones fortement interconnectés peut être utilisé pour la résolution de problèmes allant au-delà de l'informatique neuromorphique. En particulier, il pourrait être envisagé d'utiliser ce circuit neuromorphique 10 pour résoudre des problèmes difficiles non-déterministes à temps polynomial. Ces problèmes sont souvent désignés par l'expression « NP-difficiles ». Un exemple est de résoudre un problème qui peut être projeté sur un modèle d'Ising. Une telle potentialité pourrait faire d'un tel circuit neuromorphique 10 un concurrent sérieux aux réalisations d'ordinateur quantique.

[0135] En outre, le circuit neuromorphique 10 est aisément reconfigurable. Le même circuit neuromorphique 10 peut être utilisé pour effectuer différentes opérations. Pour cela, il suffit de modifier les signaux de l'unité de configuration 28 et de l'unité d'interrogation 30 en fonction de l'application visée.

[0136] *EXEMPLE PARTICULIER*

[0137] Un exemple particulier d'implémentation du circuit neuromorphique 10 est maintenant décrit en référence à la [Fig.4].

- [0138] Dans cet exemple spécifique, le composant 26 est réalisé en élément ferromagnétique.
- [0139] Selon l'exemple proposé, l'élément ferromagnétique est le grenat de fer et d'yttrium.
- [0140] Le grenat de fer et d'yttrium est plus communément dénommé YIG et désigne l'élément de formule chimique $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. L'abréviation YIG renvoie ici à la dénomination anglaise correspondante de « *Yttrium Iron Garnet* ».
- [0141] Le composant 26 est ici une couche mince.
- [0142] Une telle couche est obtenue par croissance d'une couche ou d'une multicouche dont au moins une des couches est magnétique.
- [0143] La taille et la géométrie du composant 26 sont choisies pour avoir une séparation énergétique appropriée entre modes.
- [0144] Typiquement, pour une couche simple de YIG formant un cylindre, la taille de la base du cylindre est de quelques micromètres.
- [0145] La forme de la base est circulaire (comme visible sur la [Fig.4]) ou rectangulaire.
- [0146] L'épaisseur de la couche formant le composant 26 est typiquement de quelques dizaines de nanomètres.
- [0147] Du fait de ces dimensions, le composant 26 est une microstructure magnétique.
- [0148] Le composant 26 est recouvert éventuellement d'une surcouche 50 comme c'est le cas dans l'exemple illustré.
- [0149] La surcouche 50 sert à ajuster dynamiquement l'amortissement magnétique effectif du composant 26. L'amortissement est, par définition, le temps de vie caractéristique des différents états d'excitation.
- [0150] La surcouche 50 est, par exemple, réalisée en platine.
- [0151] La surcouche 50 est contrôlée par un générateur de courant. Un tel générateur peut délivrer du courant continu ou un courant formant des créneaux temporels.
- [0152] Dans un tel système, il est observé des oscillations collectives de l'aimantation autour de la configuration d'équilibre.
- [0153] Ces oscillations sont des ondes de spins qui présentent des modes d'excitation quantifiés.
- [0154] Les modes d'excitation correspondent donc ici à un spectre de fréquences discret.
- [0155] Comme expliqué dans la section précédente, ces modes d'excitation peuvent être utilisés pour réaliser les neurones du réseau de neurones.
- [0156] Les différentes interactions ayant lieu naturellement dans les éléments ferromagnétiques peuvent être décrites par un champ effectif approprié, qui dépend lui-même de l'aimantation, rendant la dynamique des modes d'excitation, pour des écarts suffisamment importants par rapport au mode d'excitation fondamental, fortement non-linéaire.
- [0157] Plus précisément, la dynamique de l'aimantation couplée à des effets géométriques et

à des stimuli externes tels que des champs et des courants appliqués génère des interactions non-linéaires par échange et des interactions dipôle-dipôle.

[0158] Cela correspond à un régime dans lequel la plupart des modes d'excitation des ondes de spin sont couplés ensemble et l'amplitude du couplage dépend de la population de chaque mode d'excitation.

[0159] Comme expliqué dans la section précédente, ces couplages peuvent être utilisés pour réaliser les synapses du réseau de neurones en bénéficiant d'une connectivité élevée.

[0160] En outre, il est possible de modifier dynamiquement les poids synaptiques de chaque synapse en contrôlant la population de chacun des modes d'onde de spin par application d'un signal extérieur.

[0161] Pour cela, il est utilisé comme unité de configuration 28 une antenne.

[0162] L'unité de configuration 28 est propre à faire apparaître des non-linéarités à très faible amplitude d'excitation, typiquement pour quelques microTeslas (-30 dBm) de champs magnétiques alternatifs à 10 GHz.

[0163] Une excitation plus forte du composant 26 permet d'atteindre des régimes non linéaires profonds de dynamique des ondes de spin. Dans un tel régime, l'indexation des modes linéaires n'est plus une description physique adéquate du comportement du système.

[0164] L'unité de configuration 28 utilise alors des signaux radiofréquences dans les domaines temporel et fréquentiel pour peupler sélectivement les modes d'excitation propres, la densité spectrale de ces signaux respectant les conditions d'excitation précédentes.

[0165] L'unité d'interrogation 30 est soit la même antenne que l'unité de configuration 28 soit, comme représenté sur la [Fig.4], une autre antenne.

[0166] Il est à noter que le YIG est ici particulièrement adapté parce que les couches minces peuvent être nanostructurées jusqu'à 300 nanomètres (nm) sans aucun impact négatif sur leurs propriétés magnétiques. En particulier, le YIG présente un amortissement très faible des ondes de spin, cet amortissement pouvant atteindre 8×10^{-5} dans les géométries décrites dans cette section.

[0167] Ce faible amortissement donne lieu à un comportement dynamique extrêmement riche avec de nombreux effets non-linéaires rendant ainsi les modes d'excitation accessibles. Une bonne exploitation de ces effets non-linéaires permet de contrôler aisément les configurations $\mathbf{k}_i(n_i)$.

[0168] D'autres matériaux que le YIG peuvent néanmoins être envisagés.

[0169] En particulier, les matériaux sont des alliages métalliques des éléments, tels NiFe, CoFeB ou CoNi.

[0170] En variante, les matériaux sont des composés Heusler comme CoFeMnSi.

[0171] Il est également possible d'utiliser du YIG dopé ou de substituer l'yttrium Y du YIG

par un autre atome, par exemple du thulium (Tm) ou du bismuth (Bi).

[0172] Le circuit neuromorphique 10 est ici un dispositif spintronique. A ce titre, il présente l'avantage d'être compatible avec les circuits CMOS.

[0173] *AUTRES EXEMPLES PARTICULIERS*

[0174] La réalisation particulière décrite dans la section précédente n'est pas limitative puisque de nombreux autres systèmes physiques présentent des comportements analogues de leur spectre d'excitation.

[0175] En particulier, les cristaux photoniques qui sont des cavités optiques réalisées par nanostructuration sont des éléments multimodes. En outre, le régime non-linéaire et les couplages entre modes peuvent être obtenus par une modulation de la constante diélectrique par génération de paires électron-trous par pompage optique.

[0176] A titre d'autre exemple, on peut considérer les métamatériaux qui sont des systèmes versatiles ou les résonances peuvent être définies de façon géométrique. En utilisant des métamatériaux peu dissipatifs, le fonctionnement en régime non-linéaire serait obtenu. Un résonateur supraconducteur est un exemple d'un tel métamatériau.

[0177] Plus généralement, il suffit de disposer d'un système physique propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective et que chaque paire de modes d'excitation soit couplée par un couplage respectif et contrôlable.

[0178] Il est à noter ici qu'il n'est pas nécessaire de pouvoir contrôler tous les modes d'excitation propres du système physique mais uniquement une partie et que sur cette partie, le couplage soit contrôlable par la population de ces modes d'excitation propres.

[0179] En outre, les modes non accessibles peuvent néanmoins être utilisés pour augmenter le nombre de degrés de liberté et ainsi augmenter considérablement la profondeur du réseau de neurones réalisé.

[0180] Un tel contrôle pourra utiliser tout effet physique de sorte que les unités de configuration 28 et d'interrogation 30 pourront être une unité d'excitation optique, une unité d'excitation électrique.

Revendications

- [Revendication 1] Circuit neuromorphique (10) réalisant physiquement un réseau de neurones, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, le circuit neuromorphique (10) comprenant :
- au moins un composant (26) propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant (26) étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée par un couplage respectif, chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones,
 - une unité de configuration (28) du au moins un composant (26), l'unité de configuration (28) étant propre à exciter le composant (26) pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction d'une architecture souhaitée de réseau de neurones, l'architecture souhaitée comportant des neurones d'entrée et des neurones de sortie, et
 - une unité d'interrogation (30) du au moins un composant (26), l'unité d'interrogation (30) du composant (26) étant propre à modifier sélectivement les populations de premiers modes d'excitation propres et à mesurer les populations de deuxièmes modes d'excitation propres, les premiers modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones d'entrée et les deuxièmes modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones de sortie.
- [Revendication 2] Circuit neuromorphique selon la revendication 1, dans lequel le composant (26) est propre à être excité dans un régime dans lequel l'amplitude d'un couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres dans chaque configuration d'excitation dépend des populations respectives de chacun des deux modes d'excitation propres.
- [Revendication 3] Circuit neuromorphique selon la revendication 1 ou 2, dans lequel l'au moins un composant (26) présente deux régimes, un premier régime dans lequel l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres est indépendante de la population de chacun des deux modes d'excitation propres et un deuxième régime dans lequel l'amplitude du couplage entre chaque paire de modes d'excitation propres dépend de la population de chacun des deux modes d'excitation propres, l'unité de configuration (28) étant propre à exciter le

- composant (26) dans le deuxième régime.
- [Revendication 4] Circuit neuromorphique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'unité de configuration (28) est propre à exciter les modes d'excitation propres selon une configuration initiale différente de la configuration d'excitation choisie, le composant (26) se relaxant vers la configuration d'excitation choisie.
- [Revendication 5] Circuit neuromorphique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'au moins un composant (26) est une couche en élément ferromagnétique.
- [Revendication 6] Circuit neuromorphique selon la revendication 5, dans lequel l'élément ferromagnétique est un grenat de fer et d'yttrium.
- [Revendication 7] Circuit neuromorphique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'au moins un composant (26) est choisi dans la liste constituée de :
- une microstructure magnétique
 - une cavité,
 - un métamatériau, et
 - un résonateur supraconducteur.
- [Revendication 8] Circuit neuromorphique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel l'unité de configuration (28) est choisie parmi :
- une unité d'excitation optique, et
 - une unité d'excitation électrique.
- [Revendication 9] Circuit neuromorphique selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel l'unité d'interrogation (30) est choisie parmi :
- une unité d'excitation optique, et
 - une unité d'excitation électrique.
- [Revendication 10] Procédé de réalisation physique d'un réseau de neurones présentant une architecture souhaitée, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, le procédé de réalisation physique comprenant :
- une étape de configuration d'au moins un composant (26) d'un circuit neuromorphique (10) réalisant physiquement un réseau de neurones ayant été configuré, l'au moins un composant (26) étant propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant (26) étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée

par un couplage respectif,
chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones, l'étape de configuration étant mise en œuvre par une unité de configuration (28) du au moins un composant (26), l'unité de configuration (28) faisant partie du circuit neuromorphique (10) et comprenant l'excitation du au moins un composant (26) pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction de l'architecture souhaitée.

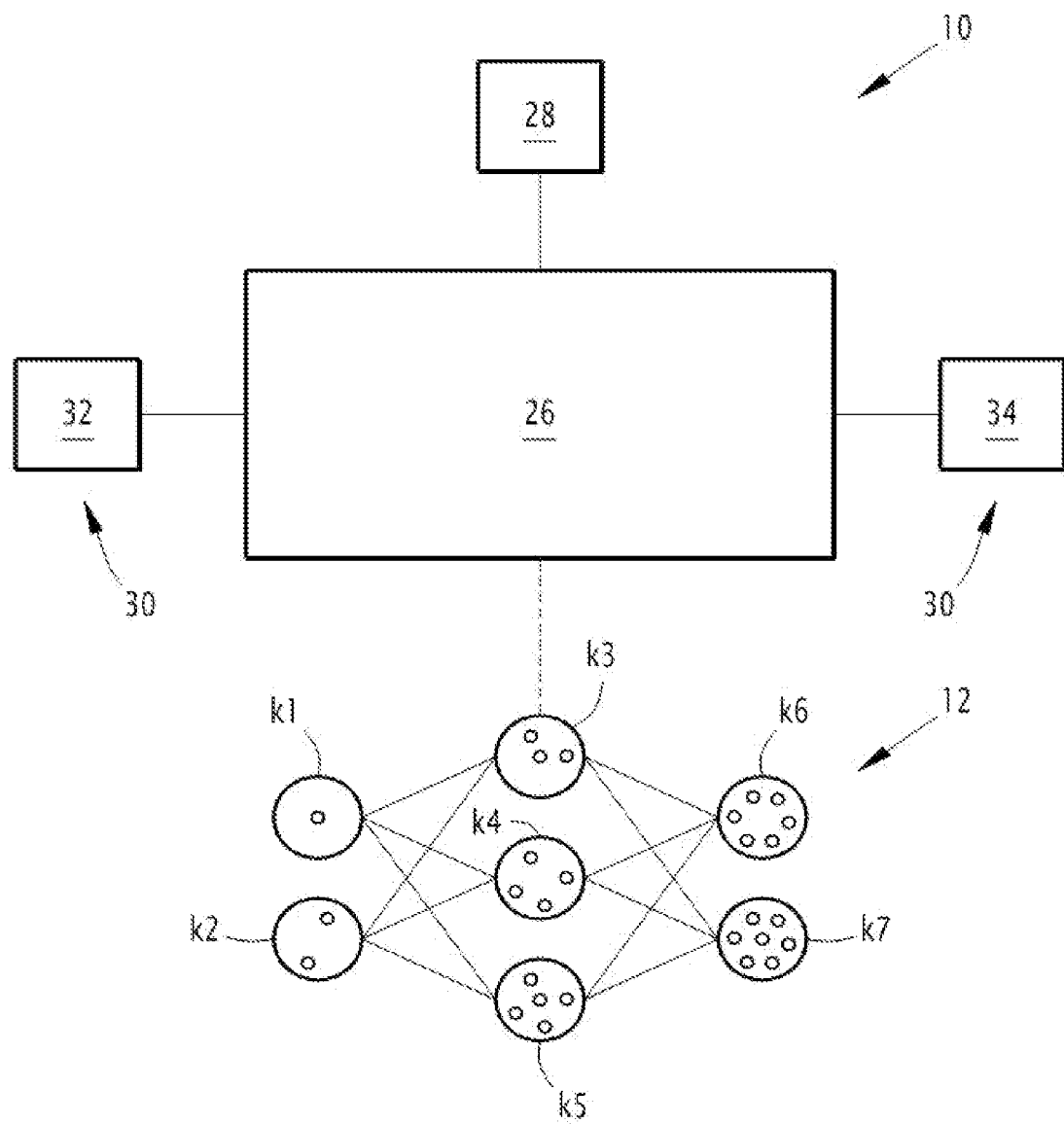
[Revendication 11]

Procédé d'inférence d'un réseau de neurones présentant une architecture souhaitée, le réseau de neurones comportant un ensemble de neurones reliés par des synapses, au moins un composant (26) d'un circuit neuromorphique (10) réalisant physiquement un réseau de neurones ayant été configuré, l'au moins un composant (26) étant propre à être excité selon une pluralité de modes d'excitation propres avec une population respective, le composant (26) étant ainsi propre à présenter plusieurs configurations d'excitation, chaque configuration d'excitation étant définie par les modes d'excitation propres excités et leur population respective, chaque paire de modes d'excitation étant couplée par un couplage respectif,

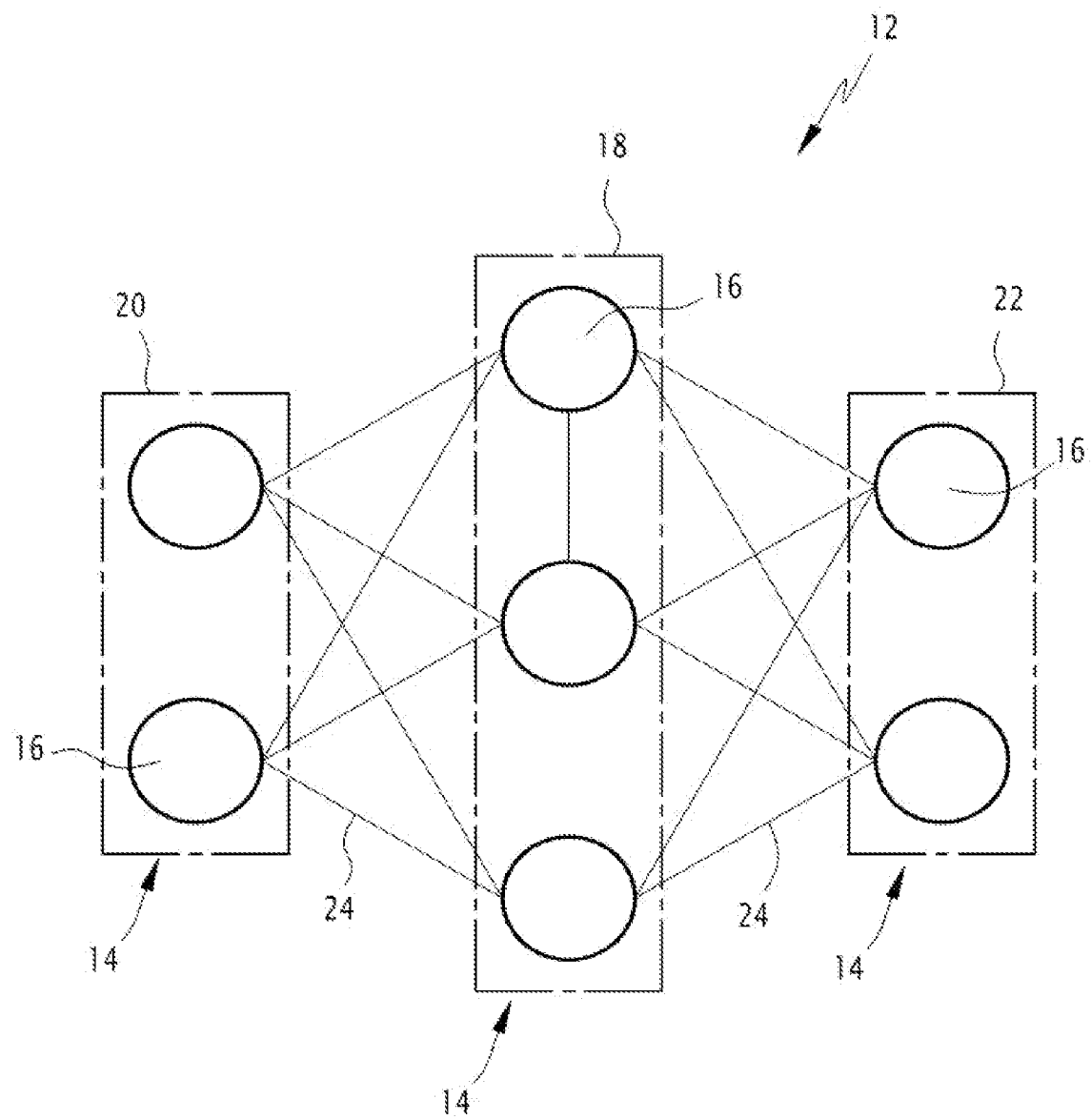
chaque mode d'excitation propre étant un neurone du réseau de neurones et chaque couplage étant une synapse du réseau de neurones, la configuration ayant été mise en œuvre par une unité de configuration (28) du au moins un composant (26), l'unité de configuration (28) faisant partie du circuit neuromorphique (10) et comprenant l'excitation l'au moins un composant (26) pour obtenir une configuration d'excitation choisie en fonction de l'architecture souhaitée, le procédé d'inférence comportant :

- une étape de modification sélective des populations de premiers modes d'excitation propres, les premiers modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones d'entrée, l'étape de modification étant mise en œuvre par une unité d'interrogation (30) du circuit neuromorphique (10), et
- une étape de mesure des populations de deuxièmes modes d'excitation propres, les deuxièmes modes d'excitation propres étant les modes d'excitation des neurones de sortie, l'étape de mesure étant réalisée après atteinte d'un état stable pour l'au moins un composant (26), l'étape de mesure étant mise en œuvre par l'unité d'interrogation (30).

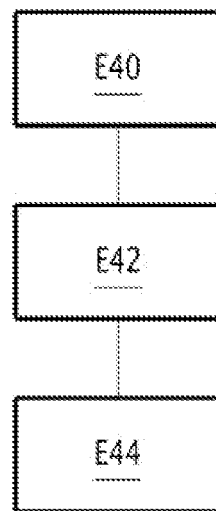
[Fig. 1]



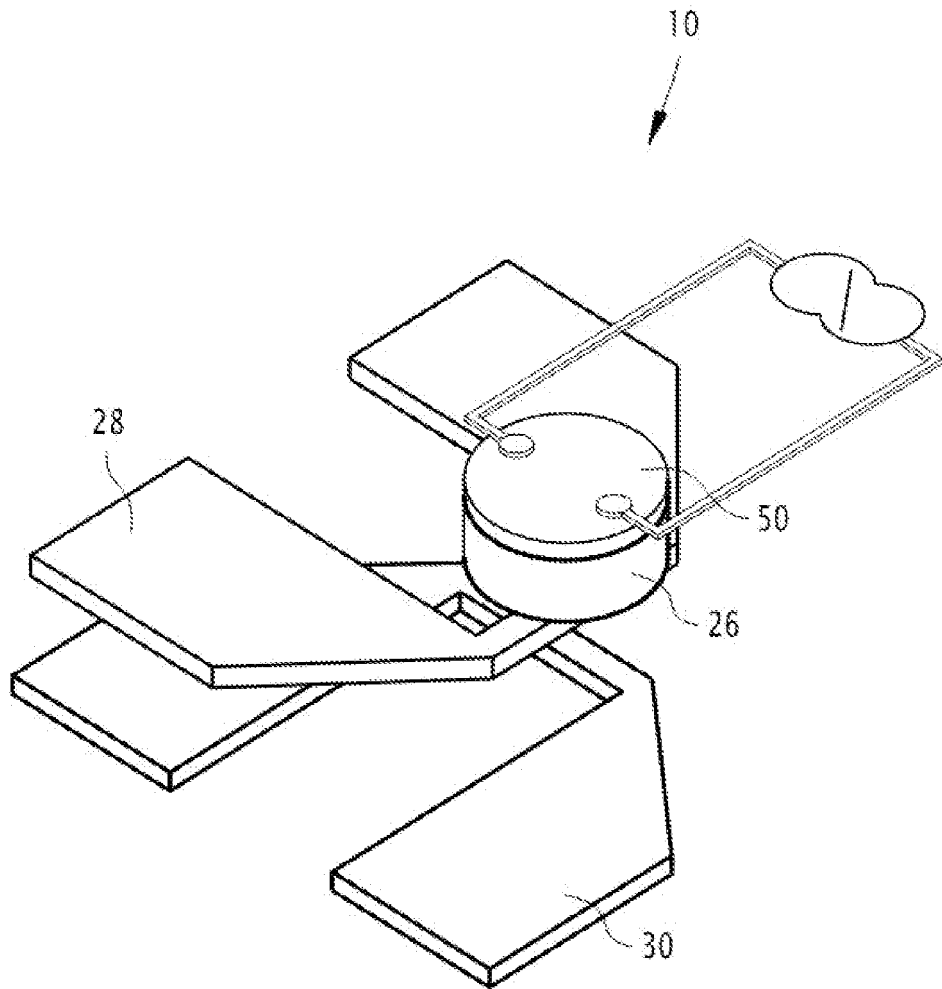
[Fig. 2]



[Fig. 3]



[Fig. 4]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 914092
FR 2208016

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 2020/021004 A1 (THALES SA [FR]; CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 30 janvier 2020 (2020-01-30) * page 3, ligne 9 – ligne 10 * * page 3, ligne 15 – ligne 20 * * page 11, ligne 8 – ligne 9 * * page 16, ligne 29 – ligne 36 * * page 17, ligne 7 – ligne 10 * * page 17, ligne 15 – ligne 16 * * page 17, ligne 24 – ligne 30 * * page 19, ligne 34 – ligne 35 * * page 25, ligne 34 – ligne 36 * * page 27, ligne 1 – ligne 1 * * page 28, ligne 14 – ligne 19 * * page 28, ligne 28 – ligne 30 * * revendications 1,8; figures 1,6 * * page 28, ligne 7 – ligne 9 * * page 2, ligne 33 – ligne 34 * ----- -/--	1-11	G06N3/06 G06N3/02
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G06N H01F G02F
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
25 mai 2023		Tidriri, Khaoula	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 914092
FR 2208016

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	MIZRAHI ALICE ET AL: "Neural-like computing with populations of superparamagnetic basis functions", NATURE COMMUNICATIONS, [Online] vol. 9, no. 1, 18 avril 2018 (2018-04-18), XP093049160, DOI: 10.1038/s41467-018-03963-w Extrait de l'Internet: URL: https://www.nature.com/articles/s41467-018-03963-w.pdf [extrait le 2023-05-24] * figures 1, 3 * * page 3, colonne 1, ligne 1 - ligne 4 * * page 3, colonne 1, ligne 15 - ligne 18 * * page 3, colonne 2, ligne 21 - ligne 23 * * page 3, colonne 2, ligne 37 - ligne 46 * * page 8, colonne 1, ligne 1 - ligne 3 * * page 7, colonne 1, ligne 14 - ligne 16 * * page 9, colonne 1, ligne 16 - ligne 18 * * page 9, colonne 1, ligne 22 - ligne 23 * * Equations (8) et (9) * -----	1-5, 7-11	
A	KATHERINE S RILEY ET AL: "Neuromorphic metamaterials for mechanosensing and perceptual associative learning", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 18 mars 2022 (2022-03-18), XP091193115, * Titre, Abstract, Section V.A * ----- -/--	7-9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
25 mai 2023		Tidriri, Khaoula	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 914092
FR 2208016

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	SHAINLINE JEFFREY M. ET AL: "Superconducting Optoelectronic Circuits for Neuromorphic Computing", PHYSICAL REVIEW APPLIED, [Online] vol. 7, no. 3, 1 mars 2017 (2017-03-01), XP093048201, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.034013 Extrait de l'Internet: URL:https://journals.aps.org/prapplied/pdf/ /10.1103/PhysRevApplied.7.034013> [extrait le 2023-05-19] * abrégé * -----	7	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	Anonymous: "Yttrium-Iron Garnet - an overview ScienceDirect Topics", / 1 janvier 2010 (2010-01-01), XP093048227, Extrait de l'Internet: URL:https://www.sciencedirect.com/topics/p hysics-and-astronomy/yttrium-iron-garnet [extrait le 2023-05-21] * page 1, ligne 1 - ligne 2 * -----	6	
A	GROLLIER J. ET AL: "Neuromorphic spintronics", NATURE ELECTRONICS, [Online] vol. 3, no. 7, 2 mars 2020 (2020-03-02), pages 360-370, XP093047260, DOI: 10.1038/s41928-019-0360-9 Extrait de l'Internet: URL:https://www.nature.com/articles/s41928 -019-0360-9> [extrait le 2023-05-24] * le document en entier * -----	1-9	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
25 mai 2023		Tidriri, Khaoula	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2208016 FA 914092

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **25-05-2023**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française