

# Introduction

Façonnée par des millions d'années d'évolution, la nature présente une incroyable diversité de systèmes qui évoluent et s'adaptent à leur environnement par l'échange, le stockage et le traitement d'information. Considérée comme un système computationnel, la nature présente ainsi des capacités de calcul extrêmement performantes et efficaces. La conception de systèmes de calculs bio-inspirés part de ce constat de performance et cherche à implémenter des mécanismes observés dans la nature. Cette démarche a fait ses preuves dans de nombreux domaines de l'informatique, en particulier en intelligence artificielle, robotique ou optimisation. Citons par exemple les algorithmes d'optimisation s'inspirant des colonies de fourmis, des essaims d'abeilles, des bancs de poissons ou des chauves-souris, tous ces groupes d'animaux présentant des stratégies de communication efficaces pour accomplir une tâche donnée (Darwish 2018). De plus, la recherche en biologie ne cesse d'évoluer, amenant avec elle de nouvelles possibilités d'inspiration biologique.

Le cerveau, vu comme un système computationnel, est un des systèmes les plus complexes connus. Aussi l'inspiration biologique occupe une place de premier rang dans les débuts de la recherche en intelligence artificielle. Les premiers modèles d'apprentissage s'appuyaient par exemple sur des modèles simplifiés de neurones biologiques, tels que McCulloch et Pitts 1990 et ont conduit plus tard à la conception du perceptron, à l'origine des réseaux actuels de *Deep Learning*. Les réseaux convolutifs (CNN) (LeCun et Bengio 1998), qui ont révolutionné l'apprentissage d'image, se placent également dans une inspiration biologique, s'inspirant de la décomposition du champ visuel et de la hiérarchie de traitement de l'information visuelle observée dans le cerveau.

De nombreux travaux en neurosciences, dont Binzegger et al. 2005; Meunier et al. 2009; Sporns 2013; Betzel et Bassett 2017 proposent que le cortex n'est pas hiérarchique, mais une architecture composée de modules auto-organisés. Ces modules échangent en continu des informations sensorielles collectées par l'organisme. Ces échanges sont réalisés de façon interne, liant des informations sensorielles et des informations de plus haut niveau provenant de différentes parties du cortex et à différentes échelles spatiotemporelles. Enfin, bien qu'une hiérarchie de traitement de l'information apparaisse entre certains modules, de nombreux circuits de rétroactions semblent présents à différents niveaux de l'architecture. Cette propriété de modularité se retrouve dans de nombreux systèmes biologiques (Clune et al. 2013). Elle présente des avantages en termes

de réutilisation, de robustesse aux fautes, de redondance et de traitement local de l'information. Surtout, cette propriété de modularité est à l'origine des comportements collectifs et des structures dynamiques complexes au sein de ces systèmes (Flake 1998 ; Siebert et al. 2020). Dans le cerveau, ces structures dynamiques générées par les interactions entre les neurones semblent être à l'origine de l'apprentissage et la prise de décision. Ces comportements fascinants motivent la création de systèmes de calcul modulaires bio-inspirés, dans une recherche de mécanismes de calcul émergents.

Prenons le temps de définir la modularité d'un point de vue computationnel. Sa définition varie en effet en fonction des disciplines. D'un point de vue des sciences de l'ingénieur, un système modulaire est un système composé de sous-systèmes, les modules, qui peuvent être ajoutés ou supprimés sans impacter la fonction des autres modules. Il s'agit d'une approche classique de conception de systèmes en sciences de l'ingénieur : pour résoudre un problème, on le décompose en sous-problèmes, puis on développe des modules visant à résoudre chacun de ces sous-problèmes. Dans ce cadre, chaque module a une fonction spécifique et contribue à une tâche globale indépendamment des autres modules. La définition bio-inspirée de la modularité s'attache en priorité aux interactions entre les modules. Dans cette approche, les modules des architectures sont en interaction continue dans le temps et présentent des boucles de rétroaction. Les interactions sont gérées de façon locale, sans être supervisées par un processus externe. Grâce aux rétroactions, ces architectures sont des systèmes dynamiques. Le comportement global du système résulte alors de l'interaction entre les modules et non seulement de la somme des comportements des modules pris individuellement : il s'agit de systèmes complexes. Dans cette vision bio-inspirée, la fonction de chaque module n'a de sens que par ses interactions au sein de l'architecture.

? La création d'architectures cognitives correspond à cette approche bio-inspirée des architectures modulaires (Kotseruba et Tsotsos 2018). Il s'agit en particulier de développer des réseaux de neurones autonomes, capables de mémoire et de prise de décision de façon non supervisée, en s'inspirant des capacités du cerveau. Ces architectures cognitives trouvent leur application en robotique autonome. L'incorporation de mécanismes d'apprentissage au sein d'agents doit en effet prendre en compte l'aspect temporel et continu du flux de donnée entrant, ce qui appelle à la conception d'architectures d'apprentissage capables de prise de décision autonome. Brooks 1986 a par exemple exploité cette approche modulaire avec son architecture de *subsumption*. L'auteur propose un système artificiel composé de modules ayant une fonction simple, telle que « avancer » ou « éviter un objet ». Ces modules sont connectés au sein d'une architecture présentant des rétroactions. Il met en évidence que malgré la simplicité de chacun des modules, le robot est capable d'effectuer des tâches plus complexes, comme explorer son environnement ou suivre une trajectoire tout en évitant les obstacles. Ces tâches de décision émergent de l'interaction des modules simples. Dans cet exemple, les modules ont une structure préétablie et sont différenciés. Nous pouvons enfin imaginer des architectures dont les modules sont a priori indifférenciés et interchangeables et vont se spécialiser dans l'architecture au cours d'un l'apprentissage.

---

Finalement, nous entendons par architecture modulaire d'apprentissage une architecture composée d'une multiplicité de sous-systèmes indifférenciés, interchangeables et évoluant dans le temps. Ils communiquent entre eux par une interface bien définie et présentent des boucles de rétroaction, leur conférant un aspect dynamique. Cette interaction est traitée localement au sein des modules, sans supervision par un processus extérieur. Nous pensons que cette approche modulaire de l'apprentissage est propice au développement de nouveaux mécanismes émergeant de l'interaction entre les modules.

~ Dans cette thèse, nous nous intéressons à un modèle d'apprentissage bio-inspiré existant : les cartes de Kohonen (Kohonen 1982). Ces modèles d'apprentissage sont caractérisés par leur capacité à représenter des données de façon ordonnée sur un espace de dimension plus faible (typiquement une ou deux dimensions). L'algorithme d'apprentissage d'une carte auto-organisatrice suit un principe assez simple. Une carte est composée de vecteurs de l'espace d'entrée (prototypes) positionnés sur une grille de faible dimension. Ils sont initialement distribués aléatoirement dans l'espace d'entrée. L'apprentissage est réalisé en présentant les entrées une à une à la carte, en trouvant leur *Best Matching Unit* qui est le prototype le plus proche de l'entrée, puis en déplaçant ce prototype ainsi que ses voisins dans la grille vers l'entrée courante. À l'issue de ce processus d'apprentissage, la grille munie des prototypes est dépliée sur l'espace d'entrée. N'importe quel vecteur de l'espace d'entrée peut être représenté par une position sur la grille.

La littérature autour des cartes de Kohonen est extrêmement fournie, en témoigne la bibliographie étendue réunissant 7717 travaux entre 1981 et 2005, réunie par Kaski et al. 1998 ; M. Oja et al. 2002 ; Honkela et Kohonen 2009. Toutefois, elle s'est principalement attachée à l'amélioration des performances des cartes sur des applications d'apprentissage automatique et de fouille de données, comme de la compression d'image ou du clustering (Kohonen 2013). Nous pensons que leur inspiration biologique, leurs propriétés d'auto-organisation et de représentation en deux dimensions d'un espace complexe, et la simplicité de leurs règles de mise à jour en font des candidates naturelles pour la création d'une architecture modulaire d'apprentissage. D'une part les cartes auto-organisatrices peuvent être vues comme un modèle très simplifié d'une aire corticale. Leur assemblage en architecture permettrait de pousser cette inspiration biologique au niveau de la structure du cerveau, dont les aires fonctionnelles semblent présenter des rétroactions à différents niveaux. D'autre part, elles définissent une représentation en faible dimension de l'espace d'entrée, accessible par les positions dans la carte. D'un point de vue computationnel, cette position se place comme une information peu coûteuse à échanger au sein d'une architecture.

X L'idée d'architecture modulaire de cartes auto-organisatrices semble donc découler naturellement du modèle. Cet propos est d'ailleurs formulée par Kohonen dès 1995 :

« Un objectif à long terme de l'auto-organisation est de créer des systèmes autonomes dont les éléments se contrôlent mutuellement et apprennent les uns des autres. De tels éléments de contrôle peuvent être implémentés par des SOMs spécifiques ; le

problème principal est alors l'interface, en particulier la mise à l'échelle automatique des signaux entre les modules et la collecte de signaux pertinents comme interface entre les modules. Nous laisserons cette idée aux recherches futures. » (Traduit de Kohonen 1995)

Depuis, bien que des travaux aient proposé des architectures hiérarchiques de cartes auto-organisatrices, peu ont cherché à les assembler en architectures modulaires non-hiérarchiques.

Nous proposons dans cette thèse de construire une architecture modulaire non-hiérarchique de cartes auto-organisatrices. Notre démarche est synthétique : d'abord, nous développons une variante de carte pouvant être assemblée en architecture modulaire, puis nous cherchons expérimentalement à comprendre les comportements qui émergent de l'association des modules. L'architecture que nous proposons rejoint l'idée d'implémenter des mécanismes liés à la cognition, tels que l'apprentissage non-supervisé, la prise de décision autonome, l'apprentissage associatif de données multimodales et le traitement de données temporelles, s'inspirant du traitement multisensoriel du cerveau humain. Dans cette thèse, nous explorons en particulier la tâche d'apprentissage associatif de données multimodales. Il s'agit pour l'architecture d'apprendre des relations existant entre des entrées provenant de différents espaces, en plaçant cet apprentissage de relations à un niveau interne à l'architecture. Le but est d'apprendre à la fois une représentation de chaque espace d'entrée et de leurs relations.

\*

Cette thèse présente deux problématiques principales entremêlées : (i) développer un modèle d'architecture non-hiérarchique de cartes auto-organisatrices exploitant l'aspect spatialement ordonné de ce modèle d'apprentissage, et (ii) élaborer une méthodologie expérimentale et des outils permettant de mettre en évidence et évaluer l'apprentissage associatif qui émerge d'une telle architecture.

\*

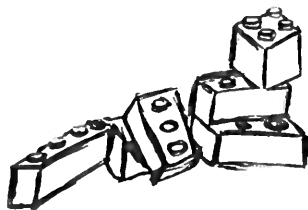
Le manuscrit est organisé de la façon suivante. Le chapitre 1 présente un état de l'art des architectures de cartes auto-organisatrices existant dans la littérature. Ces modèles d'architectures sont issus de plusieurs domaines, de l'apprentissage automatique aux neurosciences computationnelles. Le chapitre propose une revue des modèles principaux en s'attachant à unifier les notations et leurs désignations afin d'identifier les points communs et différences principales de conception de ces modèles. Cet état de l'art nous permettra de situer le modèle que nous proposons au regard de la littérature existante.

Nous détaillerons au chapitre 2 le modèle d'architecture non-hiérarchique de cartes auto-organisatrices que nous développons et étudions dans cette thèse, que nous avons appelé CxSOM,

---

pour *Consensus-driven Multi-SOM*. Il s'inscrit dans la continuité de modèles déjà développés dans notre équipe de recherche. Nous définissons un modèle de carte qui peut être assemblé à volonté, de façon modulaire, en architecture non-hiérarchique. Ce modèle utilise la position du Best Matching Unit d'une carte comme seule interface entre les modules, rendant les activités des cartes interdépendantes. Pour gérer les rétroactions, l'apprentissage s'appuie sur une recherche de consensus entre les cartes pour la recherche d'un BMU. Le chapitre 3 est une analyse plus approfondie de la recherche de consensus entre les cartes afin de valider ce mécanisme en tant qu'algorithme de choix de BMU pour l'apprentissage.

La thèse porte sur l'analyse expérimentale des comportements d'apprentissage associatif dans des architectures de deux et trois cartes. Le pari de la construction d'une architecture modulaire est de faire émerger des nouveaux comportements et mécanismes de calcul ; aussi faut-il pouvoir les mettre en évidence. Nos travaux se sont vite confrontés à une difficulté de visualisation d'une telle architecture de cartes. Cette thèse met l'accent sur une méthode d'analyse expérimentale de cette architecture modulaire. Nous en tirerons des comportements élémentaires qui serviront à poser les bases de la construction d'architectures plus complexes. Nous introduisons au chapitre 4 cette méthode expérimentale et un cadre de représentation des entrées, et proposons une définition de ce que signifie qu'une architecture de cartes encode les entrées et leurs relations. Nous présentons ensuite au chapitre 5 les comportements élémentaires d'apprentissage associatif observés sur des architectures de deux et trois cartes en une dimension, à partir des représentations que nous avons proposées. Nous présenterons en particulier un comportement de prédiction d'entrée, rendu possible par les rétroactions et la dynamique de recherche du BMU présentes dans notre modèle. Nous explorons au chapitre 6 des indicateurs numériques d'évaluation de l'apprentissage associatif par l'architecture de cartes, dans le but d'étendre l'analyse du modèle à des architectures plus grandes, qui seraient difficilement représentables graphiquement. Le chapitre 7 étend enfin les mécanismes d'apprentissage que nous avons identifiés à des architectures de cartes en deux dimensions, se plaçant comme une étude préliminaire pour saisir la scalabilité du modèle. Nous concluons sur les perspectives de développement du modèle CxSOM que mettent en évidence nos travaux.





## Conclusion

Cette thèse se place dans un but d'exploration de mécanismes de calcul et d'apprentissage pouvant émerger de l'association de modules en architecture, ici à partir de cartes auto-organisatrices. Dans une architecture modulaire, l'apprentissage est réalisé par l'interconnexion des modules, de façon non supervisée. Nous voulions également pouvoir intégrer des connexions rétroactives entre les modules afin d'apporter l'aspect non-hiérarchique, inspiré des rétroactions existant dans le cortex cérébral. L'utilisation de cartes auto-organisatrices en tant que modules est en particulier motivée par leur capacité à représenter un espace d'entrée en une information positionnelle de faible dimension. Cette information rejoint l'organisation observée dans le cortex cérébral, et se place comme une information simple à transmettre au sein d'une architecture. Les travaux menés précédemment dans l'équipe de recherche, en Ménard et Frezza-Buet 2005; B. Khouzam et H.Frezza-Buet 2013; Baheux et al. 2014 ont proposé un modèle original d'interface entre cartes, s'appuyant sur une recherche de consensus au sein de l'architecture. Cette thèse se place dans la continuité de ces travaux et souhaite développer le modèle d'architecture et analyser les mécanismes d'organisation émergeant des règles de calcul du modèle.

Ce manuscrit présente CxSOM *Consensus-driven multi-SOM*. Ce modèle permet d'associer des cartes en architectures modulaires. Nous avons suivi une démarche de construction : à partir des architectures existantes et des modèles étudiés dans notre équipe de recherche, nous avons proposé le modèle d'architecture CxSOM, puis avons étudié expérimentalement son comportement sur des blocs de base, en vue d'un développement futur.

Dans cette démarche, le chapitre 1 se présente comme une revue des modèles existants d'architectures hiérarchiques et non-hiérarchiques construites à base de cartes auto-organisatrices. Nous avons unifié les notations de ces modèles issus de différents domaines de l'informatique. Cette revue nous a permis d'identifier les mécanismes et structures communs à ces architectures.

La première contribution de cette thèse est le développement et l'étude du modèle CxSOM, détaillé au chapitre 2, s'appuyant sur le modèle initialement présenté en Baheux et al. 2014. Ce modèle permet de construire une architecture de cartes, en utilisant la position du BMU comme seule information transmise entre les cartes. Cette position est une valeur 1D ou 2D. Aucun travail à notre connaissance n'avait utilisé uniquement la position du BMU comme interface

pour construire des architectures de cartes comportant des rétroactions. Le modèle CxSOM introduit un mécanisme original de recherche de consensus entre les cartes d'une architecture, la relaxation, qui apporte un comportement dynamique dans l'architecture. La relaxation va alors dans le sens de la création d'une architecture autonome. Nous avons observé de façon détaillée le mécanisme de relaxation au chapitre 3 afin de valider ce mécanisme comme une recherche de BMU.

La seconde contribution de la thèse est l'élaboration d'une méthodologie d'étude de l'architecture et d'analyse de son apprentissage. Nous avons choisi de nous intéresser à l'apprentissage associatif de données multimodales, l'aspect multisensoriel étant une motivation pour créer des architectures non-hiérarchiques. Chaque carte de l'architecture prend une entrée externe. Le but de l'apprentissage associatif est pour chaque module d'apprendre une représentation de leur entrée externe, tout en apprenant les relations entre les entrées au sein de l'architecture.

Afin de mettre en évidence et de quantifier comment CxSOM encode les relations entre entrées, nous avons proposé des représentations adaptées. Nous nous appuyons sur la description des entrées multimodales et des réponses des cartes par des variables aléatoires obtenues lors de phases de test. Cette méthode est présentée au chapitre 4. Nous avons modélisé les relations entre les entrées sous forme d'une variable latente,  $U$ , paramétrant le modèle sans perte d'information. La mise en évidence de l'apprentissage d'une relation entre les entrées par l'architecture revient alors à chercher comment l'architecture a encodé la variable latente  $U$  au sein des cartes. Ensuite, nous avons souligné l'importance de visualiser une organisation dans les réponses des cartes, en particulier par les BMU, et non seulement dans les poids des cartes comme la méthode classique d'évaluation des SOM. Pour une architecture de deux et trois cartes, nous avons mis en évidence que l'apprentissage associatif se traduit par une relation fonctionnelle entre  $U$  et le BMU dans chaque carte.

Le chapitre 6 <sup>prés</sup> présente des mesures statistiques permettant de quantifier l'apprentissage des relations entre entrées par une architecture de cartes, en s'appuyant sur la description de la réponse des cartes par des variables aléatoires. Nous avons envisagé deux coefficients quantifiant la propriété que  $U$  est une fonction du BMU dans chaque carte : le coefficient d'incertitude, qui est une version normalisée de l'information mutuelle, et le ratio de corrélation. Ce second indicateur s'est avéré plus adapté que le coefficient d'incertitude pour les variables continues telles que celles présentes dans notre modèle, en notant toutefois que sa valeur devra être utilisée en comparaison à des valeurs d'entrées, et non prise de manière absolue. Cet indicateur numérique permettra de comparer des expériences entre elles et d'optimiser automatiquement les paramètres d'apprentissage de l'architecture. Nous avons mis en évidence par le calcul de l'information mutuelle entre  $U$  et  $\Pi$  que chaque carte perd globalement de l'information sur le modèle  $U$ , due à la perte de précision sur la quantification vectorielle de l'entrée externe. On voudra pouvoir mesurer seulement le gain d'information sur  $U$  dans une carte, ou dans toute l'architecture, et nous



13

suggérons aux travaux futurs de s'intéresser à d'autres mesures de l'information mutuelle entre les caractéristiques des cartes pour évaluer l'apprentissage. Notons que cette méthode d'analyse du modèle n'est pas spécifique à CxSOM. Les éléments de représentation et indicateurs proposés, notamment l'information mutuelle peuvent se transposer à d'autres algorithmes d'apprentissage non-supervisés.

Cette méthode d'analyse nous a fourni un cadre permettant de mieux analyser le comportement d'architectures CxSOM élémentaires de deux et trois cartes en une dimension, apprenant sur des entrées en une dimension. Ces expériences sont présentées aux chapitres 5 et 7. Nous avons dégagé des comportements d'organisation à deux échelles, qui nous apparaissent comme inhérents aux règles de calculs définies dans CxSOM. Chaque carte est globalement organisée selon son entrée externe. Les BMU se répartissent dans un ensemble de zones de la carte en fonction de cette entrée externe, séparées par des zones mortes. Au sein de chaque région, les BMU sont définis en fonction de l'entrée contextuelle. Cette organisation permet à chaque carte de définir son BMU en fonction de toutes les entrées de l'architecture, et non seulement son entrée externe. Ce comportement marque un encodage du modèle d'entrée dans chacune des cartes, donc l'apprentissage des relations entre les entrées. Pour permettre cette encodage, nous devons prendre le rayon de voisinage externe  $h_e$  supérieur au rayon de voisinage contextuel. Ces deux élasticités permettent aux poids contextuels de s'organiser de façon subordonnée aux poids externes. hc?

Nous avons ensuite montré qu'une architecture CxSOM est capable de générer une prédiction dans une des cartes de l'architecture à laquelle on n'a pas présenté d'entrée externe lors du test. Grâce aux rétroactions, une carte acquiert une capacité de prise de décision sans avoir besoin d'un algorithme supplémentaire analysant la sortie des cartes. La prédiction s'effectue localement, au niveau d'une carte : les autres cartes de l'architecture n'ont pas besoin de savoir si les autres cartes prennent ou non leur entrée externe. Enfin, grâce aux rétroactions, la prédiction est possible pour n'importe quel carte de l'architecture. Cette capacité n'est pas permise par des architectures hiérarchiques ou des cartes classiques. Enfin, nous avons mis en évidence au chapitre 7 que le comportement observé sur les cartes en une dimension s'étend bien aux cartes en deux dimensions. Ce comportement est prometteur pour la mise en pratique des architectures de cartes sur des données de plus grande dimension. elle n'a pas ?

## Discussion

Le modèle CxSOM proposé dans cette thèse apporte un nouveau paradigme de construction d'architecture modulaire de cartes, exploitant pleinement la représentation topographiquement ordonnée d'une carte auto-organisatrice. Dans ce modèle, chaque carte encode une représentation de son entrée externe, extrayant une abstraction de chaque espace, et encode également les relations entre les entrées [dans chaque carte de l'architecture]. Nous avons mis en lumière

que cet apprentissage des représentations de chaque modalité et les rétroactions permettent un comportement original pour des cartes auto-organisatrices : une carte de l'architecture est capable de prédire une valeur à partir de ses connexions contextuelles. Cette capacité de prédiction en l'absence d'une entrée externe est prometteuse pour des applications, par exemple de robustesse à la perte d'une entrée, ou pour des tâches de prise de décision. La formation de motifs de poids contextuels, marquant l'apprentissage des associations, semble se généraliser à des architectures de trois, quatre ou dix cartes. Cette formation de motifs ainsi que l'organisation à plusieurs échelles d'une carte semblent également se transposer aux cartes en deux dimensions, qui présentent également des motifs d'organisation plus variés qu'en 1D. Ces deux observations laissent envisager un passage possible à de grandes architectures, à accompagner d'une étude paramétrique approfondie. Notons que les travaux d'analyse de CxSOM dont nous avons présenté les résultats ont été accompagnés d'un travail d'élaboration, en collaboration avec Hervé Frezza-Buet, d'une librairie C++ et python permettant le calcul et les tracés des nombreuses variables d'état qui composent une architecture de cartes. Cette librairie<sup>2</sup>, aujourd'hui plus aboutie qu'au moment où nous avons commencé nos expérimentations, facilitera grandement l'étude et la conception d'architectures comportant de nombreuses cartes. Cette étude de grandes architectures pourra s'appuyer sur les méthodes de représentation et d'analyse que nous avons proposé au cours de ce manuscrit. Notons que les indicateurs et représentations que nous avons proposées concernent l'organisation à l'échelle d'une carte. Une perspective d'amélioration de cette méthode de représentation est de chercher à évaluer une organisation d'un point de vue global à l'architecture.

Les observations réalisées dans les chapitres 5, 6 et 7 nous permettent également d'envisager des limitations générales au modèle actuel, qui seront des pistes d'études possibles pour envisager des améliorations ou des applications de l'architecture. Tout d'abord, nous avons constaté que les architectures de deux et trois cartes encodent totalement  $U$  dans chaque carte. Cet encodage apporte de la redondance au sein de l'architecture, ce qui permet la prédiction d'entrée. Dans un cas général, il n'est pas souhaitable que  $U$  soit complètement encodé dans chaque carte. Cela induirait que la valeur encodée ne peut pas dépasser une ou deux dimensions, correspondant à la dimension des cartes. Cette limite ne pourrait pas être améliorée par l'augmentation du nombre de cartes, rendant l'architecture moins pertinente. On voudrait plutôt que les différentes cartes apprennent collectivement une représentation distribuée de  $U$ , ce qui laisse la possibilité d'améliorer l'apprentissage des relations entre entrées en ajoutant des cartes à l'architecture. Cette limitation potentielle n'a pas pu être étudiée dans des architectures de seulement deux et trois cartes, mais il s'agira d'un point à vérifier et observer lors de l'étude de plus grandes architectures.

Une deuxième limitation est introduite par la double échelle de quantification vectorielle qui

---

2. <https://github.com/HerveFrezza-Buet/cxsom>

permet l'apprentissage de  $U$  dans chaque carte. Elle se traduit par les motifs pseudo-périodiques des poids contextuels et la formation de zones de BMU. Cette double échelle introduit beaucoup de nœuds morts dans la carte entre les zones de BMU, donc une perte d'unité d'apprentissage. Les règles d'apprentissage des cartes créent une continuité entre les valeurs des prototypes. Les nœuds morts sont donc nécessaires pour permettre les motifs de poids contextuels, par la nature même des règles d'apprentissage d'une carte. Pour modifier ce point, il faudrait envisager un changement dans les règles d'apprentissage de la SOM.

## Perspectives

Les perspectives directes de ces travaux sont de continuer le développement du modèle CxSOM, en s'intéressant particulièrement à l'influence des connexions au sein d'une architecture comportant plus de trois cartes. Le nombre de connexions possible au sein d'une architecture comportant un nombre fixé de cartes croît en effet exponentiellement avec le nombre de cartes et chaque configuration de connexions peut complètement modifier la façon dont se comporte l'architecture. Par ailleurs, certaines cartes peuvent ou non prendre des entrées externes, ajoutant une diversité de configurations possibles. Il reste également à définir des cas d'études sur lesquels étudier des architectures à grande échelle. L'aspect modulaire de ces architectures pourrait par exemple nous faire envisager des modules d'interaction avec l'environnement, qui traitent les entrées sensorielles et des modules d'apprentissage, en s'inspirant des structures fonctionnelles observées en biologie (Ellefsen et al. 2015). Des modélisations récentes du cortex sous forme de réseaux mettent l'accent sur son aspect modulaire multi-échelles (Betz et Bassett 2017) : le cortex semble s'organiser en une architecture dont les modules sont eux-mêmes des architectures modulaires, loin des trois modules que nous avons étudiés dans cette thèse, ce qui peut motiver la construction d'architectures de bien plus grande ampleur.

Un second objectif du développement d'architectures multi-cartes est l'intégration de connexions récurrentes entre cartes, qui pourraient permettre de combiner le traitement de données séquentielles et données multimodales au sein d'une même architecture. L'utilisation de la position du BMU comme interface a été utilisée au sein de modèles de cartes récurrentes telles que SOMSD (Hagenbuchner et al. 2003) ; ce modèle ainsi que son adaptation sur deux cartes ont fait l'objet de travaux dans notre équipe (Baheux et al. 2014 ; J. Fix et Frezza-Buet 2020). Les propriétés d'organisation observées sur ce type de cartes récurrentes rejoignent celles observées dans l'architecture CxSOM : une carte distingue son BMU en fonction de l'entrée externe, mais également en fonction de sa place dans la séquence d'entrée. Cette information transmise entre chaque pas de temps est homogène à celle transmise entre cartes dans l'architecture CxSOM. Une perspective d'étude sera ainsi d'associer des connexions temporelles et des connexions multimodales au sein d'une architecture de cartes afin de traiter des données séquentielles. Par exemple, un inconvénient de cartes récurrentes simples est le fait qu'elles oublient une séquence une fois que cette

dernière n'est plus présentée. Une architecture de cartes pourrait par exemple apporter des modules de mémoire supplémentaire pour l'apprentissage d'un ensemble de séquences et non d'une seule. Nous pouvons également envisager la construction d'un système d'apprentissage « sur le long terme », en s'inspirant des modèles proposés en Parisi et al. 2018 ; Parisi et al. 2017. Un tel système apprend au cours du temps tout en étant capable de générer des prises de décision dans le système. Les modules de l'architecture peuvent apparaître comme des modules de mémoire épisodiques et sémantiques, en choisissant différentes échelles temporelles d'apprentissage pour chaque module.

Quels que soient les applications et développements futurs du modèle CxSOM, nos travaux contribuent plus globalement à une vision originale des cartes auto-organisatrices. Nous les avons utilisées comme un support pour la conception d'un système d'apprentissage incluant une dynamique, qui s'éloigne de la vision classique de la SOM comme un algorithme de quantification vectorielle. La transmission de la seule position du BMU entre cartes est une façon élégante et simple de connecter des cartes, et les comportements d'organisation complexes observés sur des cartes 1D et 2D soulignent la force que porte une simple information positionnelle utilisée comme représentation d'un espace d'entrée.