

**1.0 Sommaire.** La proposition de recherche s'articule autour de trois axes complémentaires qui permettront de mettre en place un écosystème de puces CMOS et de microsystèmes utiles dans le domaine biomédical, autant en recherche animale que chez l'humain. **Axe 1 :** Conception d'une nouvelle génération de microsystèmes fonctionnant en boucle fermée (BF) dédiés à la recherche animale pour étudier le système nerveux central (SNC). **Axe 2 :** Combiner à l'axe 1 des nouveaux biocapteurs de signes vitaux intelligents fonctionnant en BF. **Axe 3 :** Conception d'une nouvelle génération de microsystèmes embarqués fonctionnant en BF pour des applications ambulatoires chez l'humain. Les concepts généraux de la recherche proposée sont présentés à la Figure 1.

**2.0 Progrès réalisés récemment en lien avec la proposition.** Depuis 2015, j'ai travaillé au développement de plusieurs systèmes sur puce (SoC) CMOS, microsystèmes embarqués et algorithmes appliqués à la recherche en neurosciences, en particulier pour des expériences *in vivo* avec des souris en liberté. L'objectif était de créer des systèmes ontogénétiques ultra-miniatures pouvant fonctionner en boucle fermée (BF) dans le cerveau de souris ayant des maladies neurodégénératives [1-8]. Les prototypes sont aujourd'hui considérés comme l'état de l'art et sont activement utilisés par des collaborateurs du Centre CERVO de Québec, au centre CCBN de l'Université de Lethbridge en Alberta, et au CNRS à Strasbourg, France. Depuis 2018, les SoC d'acquisition de signaux neuronaux ont été utilisés dans d'autres contextes, p. ex. pour l'acquisition de signaux électromyographiques (EMG) chez l'humain [9-12]. En tant que PRR, j'ai développé plusieurs capteurs spécialisés, dont des capteurs d'électrocardiogramme (ECG), d'EMG et des convertisseurs analogique-numérique (ADC) adaptés à ces signaux. Mes progrès récents en lien avec la proposition sont détaillés ci-dessous.

**2.1 Puces d'acquisition et de stimulation neuronale.** J'ai développé le premier SoC CMOS pour enregistrer l'activité neuronale de plusieurs microélectrodes et de stimuler optiquement dans le cerveau d'animaux transgéniques. Ce SoC, qui a été présenté à IEEE ISSCC'18 [3], comprend des bioamplificateurs, des ADCs et de la logique numérique [3-4]. Ces circuits pourront servir de base à l'élaboration des interfaces décrites à la section 5 et à la réalisation des objectifs (a, b, c) de la section 3.2.

**2.2 Traitement de signal, IA sur puce et BF.** Une contribution importante de mon travail est d'avoir développé le premier système optogénétique multicanal capable de fonctionner en BF et validé lors d'expériences *in vivo* impliquant des souris libres de leurs mouvements [2, 5-6]. À cet effet, j'ai conçu une puce CMOS numérique, le « neural decoder integrated circuit » (ND-IC), qui possède 3 modules : 1) un détecteur de PA adaptatif, 2) un module de compression, et 3) un module d'IA de classement automatique des PA. Le ND-IC et le SoC ont permis de concevoir un système autonome capable de fonctionner en BF. Le ND-IC démontre la faisabilité d'un SoC avec IA, et les compétences d'intégrations acquises seront essentielles dans la réalisation des objectifs (d, e, f) décrits à la section 3.2.

**2.3 Processeur sur puce.** J'ai conçu une puce qui regroupe les circuits du SoC, ceux du ND-IC, et qui incorpore un processeur reprogrammable [8]. Les circuits du ND-IC ont été incorporés dans l'espace d'adressage mémoire et reliés au contrôleur d'interruption. Cette puce est autonome, reprogrammable, capable de fonctionner en BF, possède une latence extrêmement petite (<1ms), et a été conçue spécifiquement pour étudier la maladie d'Alzheimer et l'épilepsie. L'expertise d'intégration d'un processeur programmable avec des modules d'IA et des interfaces analogiques dans un SoC haute densité sera essentielle à la réalisation des objectifs (d, e, f, g, h, i) décrits à la section 3.2.

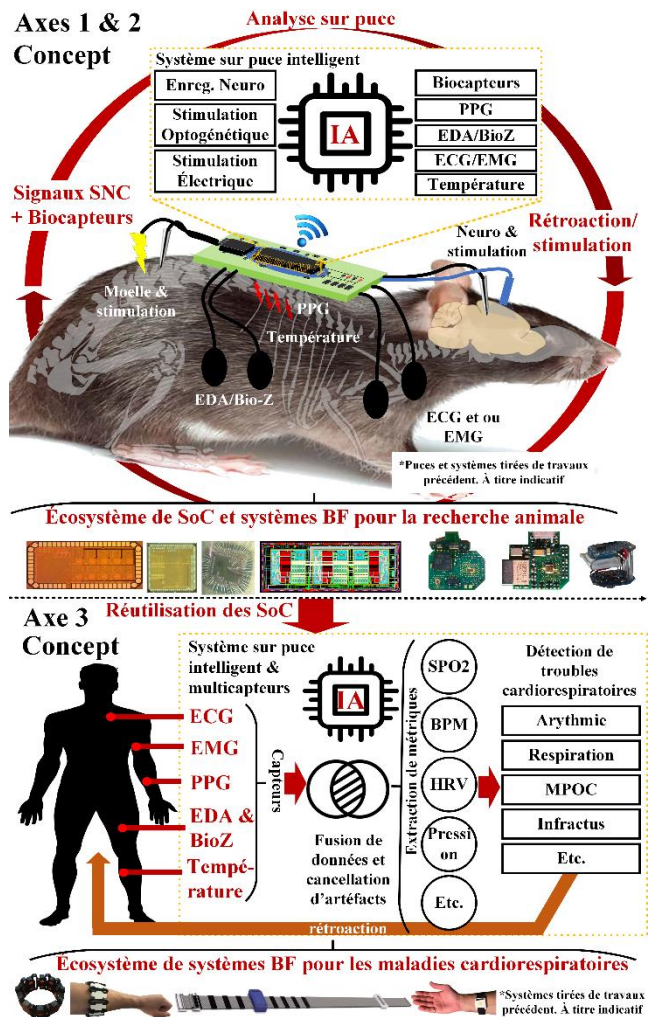


Figure 1

2.4 Capteurs de signes vitaux. Je suis co-fondateur et concepteur électronique principal de la startup MedTech SiFiLabs (sifilabs.com) qui développe des systèmes multicapteurs supporté par de l'IA pour obtenir une vue holistique de la santé d'une personne. J'ai intégré plusieurs biosenseurs, dont des capteurs d'ECG, EMG, d'activité électrodermique (EDA), de bioimpédance (bioZ), d'actigraphie et de température [13]. SiFiLabs démontre que l'IA et la fusion de données sont essentiels pour extraire des métriques utiles, et c'est pourquoi elle compte comme clients plusieurs groupes de recherches qui étudient sujets variés (épilepsie, apnée du sommeil, fatigue musculaire, etc.). L'expertise en biosenseurs sera essentielle à la réalisation des objectifs (c, e) décrits à la section 3.2.

**3.0 Objectifs.** Le programme de recherche vise le développement d'un écosystème de dispositifs miniatures et intelligents tirant avantage de la microélectronique CMOS pour le suivi et le traitement en BF de troubles biologiques. Le programme est divisé en en trois axes visant le développement de la nouvelle génération de : (1) microsystèmes fonctionnant en BF dédiés à la recherche animale pour étudier le système nerveux central (SNC); (2) biocapteurs intelligents fonctionnant en BF dédiés à la recherche animale; (3) microsystèmes embarqués fonctionnant en BF pour des applications ambulatoires.

### 3.1 Objectifs à long terme

- Concevoir un écosystème de SoC CMOS intelligents pour recueillir et traiter avec de l'IA une pluralité de signaux du SNC (LFP, ECoG, EEG, PA, etc.) et signes vitaux (PPG, ECG, EDA/BioZ, EMG, etc.).
- Concevoir un écosystème de dispositifs miniatures et sans fil construits autour des nouveaux SoC CMOS offrant une rétroaction en BF pour la recherche animale sur le SNC combinant les signes vitaux.
- Concevoir des systèmes ultras miniatures capables de détecter des troubles reliés aux maladies cardiorespiratoires chez l'humain.
- Améliorer la qualité de vie de gens avec des troubles cardio-respiratoires ou neurologiques.
- Former du personnel hautement qualifié en microélectronique, microsystème et IA embarqué.
- Établir de nouvelles collaborations avec des chercheurs en neurosciences et des spécialistes de la santé pour qu'ils puissent intégrer les nouveaux biocapteurs intelligents développés dans leur recherche.

### 3.2 Objectifs à court terme (4 étudiants PHD et 2 MSC):

- Développer des circuits CMOS d'acquisition innovants ayant la particularité de pouvoir être utilisés à la fois pour une vaste gamme de signaux du SNC (LFP, ECoG, EEG, PA, etc.) et pour plusieurs signes vitaux clés (ECG, EMG, etc.), tant en recherche animale que chez l'humain.
- Développer de nouveaux circuits CMOS de stimulation : électriques et optiques pour les expériences en BF avec souris de laboratoire, et à base d'actuateurs (mécanique, chimiques, etc.).
- Concevoir des capteurs de signes vitaux CMOS innovants : PPG, BioZ, EDA, Température, ECG/EMG (voir (a)), ultra optimisé en taille, à faible bruit et à très faible consommation énergétique.
- Concevoir des circuits et algorithmes robustes d'analyse des signaux du SNC et de prise de décision et les rendre synthétisables. P. ex. algorithmes d'analyse des PA, moelle épinière et cerveau (distance inter-PA, classement des PA par CNN, etc.), et algorithmes d'analyse basse fréquence, cerveau (onde Beta moyenne, synchronisation de phase, puissance Theta, classement des LFP via DNN, etc.).
- Concevoir des circuits et algorithmes de fusion de données et d'extraction de métrique et les rendre synthétisables. P. ex. SpO2 et BPM via PPG, HRV via ECG et BioZ, Pression artérielle via PPG, ECG et BioZ, Stress via EDA, taux de respiration via ECG et BioZ, etc.
- Concevoir des circuits et algorithmes d'analyse des métriques et de prise de décision et les rendre synthétisables. P. ex., contrôleur de type PID pour réguler le taux d'oxygène via un actuateur, détection d'arythmie cardiaque via un algorithme SCNN, etc.
- Intégrer les nouveaux circuits, algorithmes d'IA et capteurs dans des SoC CMOS à haute densité.
- Intégrer les nouveaux SoC CMOS dans des systèmes pour être utilisés avec des souris de laboratoire.
- Concevoir des systèmes ultra-optimisés pour le suivi et de troubles cardiorespiratoires chez l'humain.
- Valider chacun des circuits intégrés ainsi que les systèmes avec nos partenaires établis
- Obtenir un maximum de diversité chez les animaux (sexe, âge, etc.) et les personnes impliquées (sexe, âge, types de peaux, etc.) lors de la validation pour que les résultats obtenus soient représentatifs.

**4. Revue de littérature. Axe 1 :** La conception de microsystèmes fonctionnant en BF pour étudier le SNC a le potentiel d'accélérer la recherche fondamentale sur le SNC (moelle épinière [14-15], le cerveau [16-17] et les troubles neurologiques [18-19]). Cette technique consiste à stimuler une partie du corps en fonction de l'activité de nerfs ou groupes de neurones [16, 20]. Depuis peu, la conception de systèmes fonctionnant en BF est en pleine effervescence [15, 21-24], et les défis demeurent nombreux pour leur utilisation conjointe avec des souris de laboratoire [25]. En effet, la recherche impliquant des souris limite le poids et la puissance de calcul des systèmes électroniques ( $< 2$  g) [26]. De plus, ces systèmes doivent être rapides pour être compatible avec les temps de communications interneurones ( $< 10$  ms) [27]. Les

systèmes BF sont utilisés dans plusieurs contextes, d'où l'idée d'avoir des systèmes polyvalents. Par exemple, la possibilité de contourner une lésion de la moelle épinière en BF a été démontrée dans [15]. La technique proposée implique de stimuler avec de l'optogénétique des segments de la moelle épinière, pendant que le système enregistre les signaux EMG des muscles du tibia antérieur, et lorsque la dérivée du signal dépasse un seuil la stimulation aide à la locomotion de l'animal. La latence rapportée dans [15] est très grande, ~15 ms, ce qui est beaucoup pour les communications interneuronales. Ce problème aurait pu être contourné avec une puce CMOS sur mesure. L'utilisation d'un SoC CMOS capable de fonctionner en BF avec faible latence a été démontrée afin d'atténuer des crises d'épilepsie chez des souris [8]. Ce système peut associer des «burst» de PA à des neurones, et la stimulation en BF est déclenchée avec une latence de 0.6 ms lorsqu'un neurone est très actif. Cependant, l'algorithme de classement sans supervision proposé a le désavantage de mal classer les PA qui se chevauchent, ce qui atténue la robustesse. Des solutions plus robustes de classement des PA via des «convolutional neural networks» (CNNs) sont présentées dans [28-31]. Ces solutions, dont certaines sont capables d'identifier des PA qui se chevauchent avec des taux de succès >90%, ont été démontrées hors ligne [28-29], sur FPGA [30] et en CMOS dans [31]. En effet [31] propose un «binarized neural network» (BNN) sur puce consommant seulement 2.02  $\mu$ W. Un système doté d'un algorithme DNN appliqué sur les signaux LFP et exécuté dans un microprocesseur est présenté dans [32]. Ce système a la capacité de détecter des biomarqueurs correspondant au trouble dépressif majeur et de produire un signal de rétroaction optogénétique en BF pour en atténuer les symptômes. Bien que prometteur, ce système est lui aussi limité par l'utilisation de composants commerciales, et n'a pas été démontré *in vivo*. Il est à noter que plusieurs systèmes BF utilisant des algorithmes simples sont répertoriés dans la littérature pour être utilisés avec des souris de laboratoires. Certains utilisent des algorithmes simplistes basés sur la détection de PA [33-34] ou bien le calcul du taux de PA moyen [35-36]. D'autres calculent la valeur moyenne des ondes Beta [37], ou bien détectent la synchronisation de phase des signaux LFP avec un signal de référence [38].

**Axes 2 & 3 :** Depuis quelques années, la conception de capteurs CMOS pour surveiller des signes vitaux est en pleine effervescence. En témoignent l'implémentation CMOS de plusieurs capteurs PPG [39-41], d'EDA [41], de BioZ [41-42], d'ECG [39-41] et de température. Avoir des capteurs sur puces offre plusieurs avantages, dont celui de réduire la taille, la consommation énergétique, et la possibilité d'intégration à grande échelle. Les capteurs sont soit implémentés seuls, ou incluant deux [39] ou trois modalités [41]. Par exemple [41] démontre que l'implémentation multicapteurs d'ECG, d'EDA, de BioZ et de PPG sur la même puce permet de réduire la consommation énergétique à 1 mW. Cette puce doit être reliée à un processeur externe, car elle n'a aucune unité de traitement. Des compagnies comme Analog Devices, USA, proposent des produits qui vont jumeler plusieurs capteurs [43] dans la même puce, comme l'EDA, le BioZ et l'ECG, mais ces capteurs ne fonctionnent pas simultanément et la consommation est prohibitive (>10mW). Il a été démontré que la fusion des données jumelée à des algorithmes d'IA permet d'extraire des métriques qui sont difficilement mesurables. Dans [44], la combinaison de l'ECG et du PPG permet d'extraire le «pulse arrival time» (PAT), qui est ensuite traité par un algorithme de régression «random forest» pour extraire la pression systolique et diastolique sans calibration préalable. Un système pour suivre des patients atteints d'apnée du sommeil est présenté dans [45]. La technique proposée consiste à extraire la fréquence respiratoire à partir d'un signal BioZ capté sur l'avant-bras. L'enveloppe du signal est extraite suivie d'une FFT pour isoler la fréquence respiratoire et détecter les périodes sans respiration. Une autre métrique difficile à extraire est le niveau de stress. Pour ce faire [46] utilise une technique basée sur l'EDA et l'ECG. Il y est démontré que l'algorithme de régression de type «bagged tree» peut être utilisé pour détecter jusqu'à 3 niveaux d'anxiété. Une stratégie de détection d'arythmie cardiaque dans des systèmes embarqués est présentée dans [47]. La stratégie consiste à utiliser un algorithme de type «spike» CNN (SCNN) appliqué sur le pic de chaque forme d'onde d'ECG. Ce pic est convolué avec un noyau d'extraction de caractéristiques et ensuite passé à un réseau de neurones pour prédire la présence ou non d'arythmie. Des stratégies permettant de réguler en BF le taux d'oxygène dans le sang d'enfants prématurés sont présentées dans [48]. L'article compare des algorithmes basés sur des régulateurs PID, adaptatifs, ainsi que des algorithmes basés sur des règles (CLAC, PRICO, etc.). La simplicité de ces algorithmes permet d'envisager une implémentation sur puce avec un capteur PPG pour extraire le SPO<sub>2</sub>.

**5. Méthodologie.** La méthodologie proposée s'articule autour de 4 étudiants au Doctorat (PHD1-4) et 2 étudiants à la maîtrise (MSC1-2). Le développement des interfaces et capteurs sur puce seront confiés à PHD1-2, alors que le développement d'algorithmes d'IA sur puce sera confié à PHD3-4 et MSC1. L'intégration analogique-capteurs-IA sur puce sera un travail commun impliquant PHD1-4, alors que l'intégration système fera intervenir MSC2. Pour la conception des puces CMOS, les étudiants auront



accès aux logiciels CAD fournis par CMC Microsystems, Canada. La fabrication des puces sera également assurée par CMC Microsystems. La méthodologie (Figure 2) est détaillée ci-dessous.

**5.1 Interfaces CMOS (obj. a-b). Années 1-2 :** PHD1 aura la responsabilité de mettre en place une chaîne d'acquisition novatrice à ultrafaible consommation énergétique ayant la particularité de cibler à la fois les signaux du SNC et plusieurs signes vitaux. Pour ce faire, PHD1 concevra en technologie CMOS des circuits de conditionnement ciblant un large éventail de signaux, dont les LFP, les PA, l'ECG, et l'EMG, tout en minimisant la source de bruit 1/f qui est très présente ces types de signaux. PHD1 pourra s'appuyer sur des circuits issus de travaux précédents [3-4] qui pourraient être adaptés via des techniques de type « chopper » [49], à gain/bande passante programmable [50], et/ou avec l'utilisation de résistances commutées par cycle [51]. PHD1 devra aussi concevoir des topologies d'ADCs haute résolution ( $\geq 14$  bits) avec grande plage dynamique pour cibler les signaux de grandes amplitudes (ECG, LFP, EMG), les PA plus faibles ( $\geq 10 \mu V$ ), et aussi les signaux beaucoup plus larges, tel que ceux générés par le capteur PPG [41, 52], d'EDA [41, 53] et de BioZ [41, 54]. PHD1 pourra s'appuyer sur des ADCs issus de travaux précédents qui ont moins de résolution et de plage dynamique [3-4, 8]. Il est envisagé d'explorer les topologies de type  $\Sigma\Delta$  continu avec banque de condensateurs commutés à ultra-faible consommation énergétique [55], et/ou SAR haute résolution [56].

**5.2 Capteurs de signes vitaux (obj. d). Années 1-3 :** PHD2 devra concevoir de nouveaux capteurs de signes vitaux en technologie CMOS. PHD2 concevra un circuit PPG, incluant un amplificateur transimpédance à large plage dynamique et des sources de courant. Les sources de courant de la stimulation optogénétique pourront être réutilisés (voir 5.1.3). Le circuit accommodera les signaux de plusieurs longueurs d'onde simultanément, p. ex. rouge/IR pour extraire le  $SpO_2$ , et Bleu/Vert pour le BPM. PHD2 aura aussi la responsabilité de concevoir un nouveau circuit de mesure d'EDA et de BioZ. Le même circuit pourra servir à mesure l'EDA lorsqu'un courant DC sera injecté dans les tissus [57], alors que la BioZ sera mesurée avec l'injection de courants à haute fréquence ( $> 50$  kHz) [57]. PHD2 aura aussi la charge de concevoir un capteur précis de mesure de température sur puce [58].

**5.3 Circuit de stimulation (obj. c). Années 3-4 :** PHD1 concevra un nouveau circuit de stimulation électrique polyvalent pouvant être utilisé à la fois dans le cerveau, dans la moelle épinière, et dans des muscles. Le circuit devra être conçu pour limiter les artefacts inhérents générés dans les signaux enregistrés. Pour ce faire, une nouvelle topologie de circuit permettant d'injecter et de retirer des charges progressivement devra être conçue. PHD2 concevra un circuit de stimulation optique haute performance et polyvalent qui aura la particularité unique d'être utilisé à la fois dans les expériences ontogénétiques avec le SNC et dans le capteur PPG. Il est envisagé d'introduire un circuit de type boost à condensateurs commutés sur puce [59] afin de fournir en courant des DEL de plusieurs longueurs d'onde (p. ex. rouge, jaune, vert, bleu) à partir de source de tension limitée (p. ex. batteries Lithium limité à 3 V). PHD2 aura aussi la tâche de concevoir un circuit d'actuation sur puce pouvant servir à générer des stimuli, par exemple via de la chaleur, l'application d'une force ou un stimulus visuel [60].

**5.4 Circuits d'analyse des signaux du SNC et de prise de décision (obj. e). Années 1-3:** PHD3 et MSC1 concevront des algorithmes d'IA synthétisables en technologie CMOS pour analyser différents types de signaux du SNC. Dans un premier temps, PHD3 et MSC1 identifieront des algorithmes à valider en simulation avec des signaux issus de bases de données [61]. Ensuite, ils compareront les techniques de

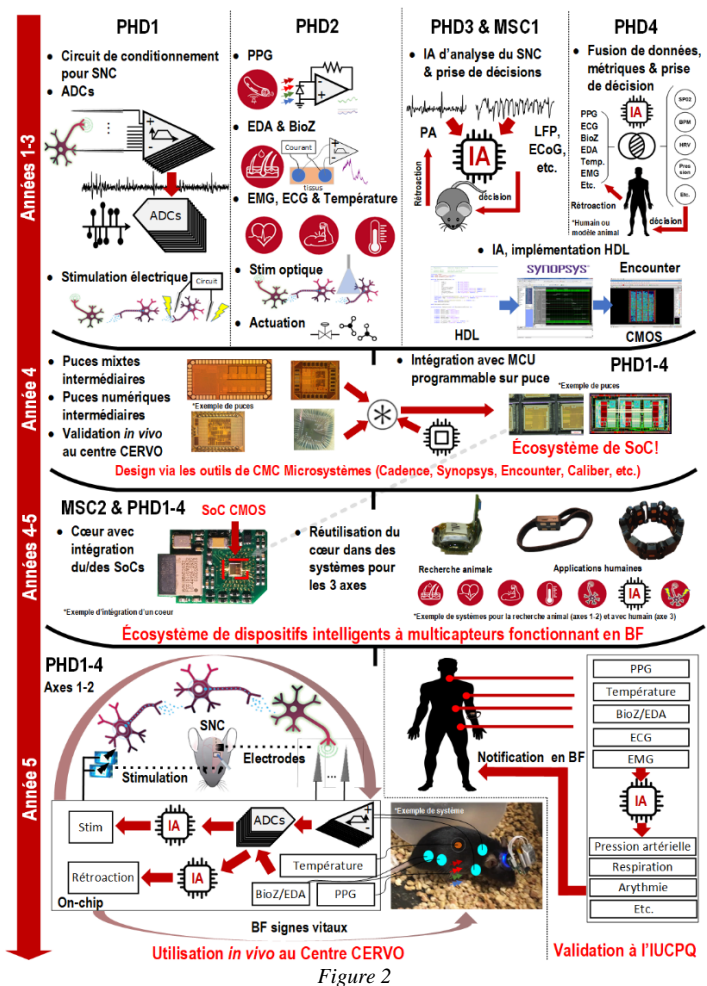


Figure 2

classement PA-neurone via un réseau CNN ou un dérivé [28-31]. Plusieurs algorithmes d'analyse des signaux LFP devront aussi être validés par PHD3 et MSC1. Outre les techniques simples de détection de puissance des ondes Beta/Theta [37-38], des techniques à base de CNN [32] seront explorées afin de déceler des patrons complexes de déclenchement de stimulation. Année 3 : PHD3 implémentera les approches retenues en langage HDL et validera les circuits sur FPGA. Ensuite, PHD3 suivra le flot de conception numérique de CMC microsystèmes, soit Synopsys->Encounter->Cadence, et utilisera les compilateurs de mémoires SRAM disponibles à ULaval.

#### **5.5 Circuits de fusion de données, d'extraction/d'analyse de métrique et prise de décision (obj. f-g).**

Années 1-3 : PHD4 et MSC1 concevront de nouveaux algorithmes synthétisables de fusion de données et d'extraction de métrique, c.-à-d. des algorithmes d'IA d'extraction de signes vitaux et de détection de troubles cardiorespiratoires. Parmi les métriques dérivées, notons la pression artérielle (ECG + PPG + IA [44]), la fréquence respiratoire (BioZ + Algorithme [45]), le niveau de stress (EDA+ECG + IA [46]), le taux de variation des battements cardiaques (ECG + IA [47]), et le taux d'SpO2 (via le PPG). Pour ce faire, PHD4 et MSC1 auront accès à des bases de données [46, 62]. L'accent sera mis sur la synthétisabilité des algorithmes pour une implémentation CMOS ultra-optimisée.

**5.6 Intégration sur puce.** Année 4 : PHD3-4 connecteront les modules numériques à un processeur reprogrammable sur puce. Cette étape, qui bénéficiera d'avancées précédentes [8], permettra de rendre les SoC plus polyvalent et facilement reprogrammable en fonction de leur utilisation dans les 3 axes proposés. PHD1-2 connecteront les circuits d'interface à l'ADC, et assureront l'interface de ce dernier au processeur, réalisant un SoC CMOS mixte complet.

**5.7 Intégration système (obj. h-j).** Années 4-5: MSC2 participera à l'intégration système en concevant des PCBs ultras petits servant de cœur pour accommoder le/les SoCs finaux. Pour ce faire, MSC2 collaborera avec PHD1-4 afin de mettre en place une architecture utilisant des composantes électroniques discrètes miniatures, et s'assurera de la mise en place d'une interface et d'un protocole de communication. PHD1-4 veilleront à l'intégration du/des SoCs avec les cœurs. Pour réduire la taille, il est prévu d'utiliser la technique « flip-chip » ou bien « wirebonding » sur PCB avec l'équipement d'assemblage disponible à ULaval. Les cœurs seront intégrés dans de nouveaux systèmes de recherche animale (plus léger, beaucoup plus intelligents et avec beaucoup plus de capteurs que [5-8]), et aussi dans des systèmes pour être utilisés chez l'humain afin de détecter différents troubles de santé cardiorespiratoires. PHD1-4 et MSC2 seront impliqués dans la réalisation de ces systèmes selon l'application (« patch », bande, « headstage », etc.).

**5.8 Validation in vivo et EDI (obj. k-l).** Chaque nouvelle puce et système seront testés *in vivo* avec des partenaires établis du Centre CERVO, du CHUL de Québec, et de l'IUCPQ de Québec. Pour les axes 1 et 2, les tests seront effectués avec souris des deux sexes et d'âges variés pour assurer un maximum de représentativité des résultats obtenus, et pour l'axe 3 la validation des systèmes impliquera la sélection de participants diversifiés (sexe, âge, types de peaux, etc.) pour s'assurer du bon fonctionnement sur un maximum de personnes et sous-groupes de population.

**6. Incidence de la recherche proposée.** Premièrement, la création de nouveaux outils innovants, combinant des circuits d'acquisition, de stimulation, et de l'IA sur puce pour faire des expériences BF, fera avancer la recherche fondamentale sur le SNC, ce qui inclut la recherche sur les maladies neurodégénératives et la moelle épinière. L'ajout de capteurs de signes vitaux clés dans les systèmes de recherche pour fermer la boucle avec des signes vitaux ouvrira de nouveaux paradigmes de recherche. Ces systèmes auront un impact considérable dans l'étude de maladies cardiorespiratoire, dont la COVID-19, et seront des outils puissants en cas de prochaine pandémie. Combiner les avancées réalisées avec les systèmes de recherche animale pour concevoir des systèmes d'études de maladies cardiorespiratoires chez l'humain permettra d'optimiser les résultats de la recherche proposée. En effet, les contraintes minimisation de taille et de consommation énergétiques imposées par l'utilisation des systèmes chez la souris vont permettre de créer des systèmes utilisables chez l'humain ultra-miniature, intelligent, autonome, et à autonomie ultra-prolongée. Ces systèmes auront un impact direct sur la vie des gens, en permettant l'étude de troubles cardiorespiratoires rependus (arythmies, infarctus, apnée du sommeil, MPOC, hypertension, etc.), mais aussi comme systèmes de détection de troubles grâce à l'IA. À court terme, il est prévu de publier les développements de circuits et d'IA dans des journaux prestigieux et des conférences internationales, comme IEEE JSSC, TBioCAS, ISSCC, EMBC, CAI, ICAIET et ISCAS. À moyen terme, l'intégration, les validations *in vivo*, et les collaborations avec des centres de recherche en santé permettront de cibler des journaux spécialisés sciences de la vie et neuroingénierie, tels que Neuron, Cell Reports, JoNe et Scientific Reports. Enfin, la recherche proposée va permettre la formation de spécialistes en microélectronique mixte, en IA embarquée et en intégration de systèmes. Il s'agit d'expertises pointues, très recherchées, et les PHQ formés seront un actif très important pour le Canada.