

Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et
de l'Enseignement Supérieur



DOCUMENT D'AUTOÉVALUATION
Équipe SYEL



Campagne d'évaluation 2023-2024 — Vague D

Table des matières

1	INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉQUIPE SYEL	3
1.1	Les thématiques scientifiques et leurs enjeux	3
	Thème modélisation	4
	Thème architecture	4
	Thème edge IA	5
	Domaines applicatifs	6
2	INTRODUCTION DU PORTFOLIO	8
3	AUTOÉVALUATION DU BILAN	9
3.1	Autoévaluation de l'équipe	9
	Domaine 2. Attractivité	9
	Domaine 3. Production scientifique	10
	Domaine 4. Inscription des activités de recherche dans la société	11
4	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SIGNIFICATIVES DE SYEL	12
A	ANNEXE — MEMBRES PERMANENTS AU 31/12/2022	13

1 INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉQUIPE SYEL

Nom de l'équipe : SYstèmes ELelectroniques (SYEL)

Responsables de l'équipe : Khalil Hachicha et Farouk Vallette

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
PR	2	2	2	1	1	1
MCF HDR	1	2	3	3	3	3
MCF	5	4	3	3	3	3
DR	0	0	0	0	0	0
CR HDR	0	0	0	0	0	1
CR	0	0	0	0	0	0
Total permanents	8	8	8	7	7	8
Émérites	0	0	0	1	1	1
Doctorants	6	4	5	8	9	13
Ingénieurs CDD ou hors tutelles	0	0	1	1	1	1
Post-doc, ATER, etc.	1	4	1	1	1	0
Stagiaires	5	9	14	4	13	10
Total non permanents	12	17	21	14	24	24
Total avec émérites	20	25	29	22	32	33
Equivalent temps plein recherche	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	4.5

TABLE 1 – Personnels SYEL sur la période 2017-2022 (au 1er juillet de chaque année)

1.1 Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

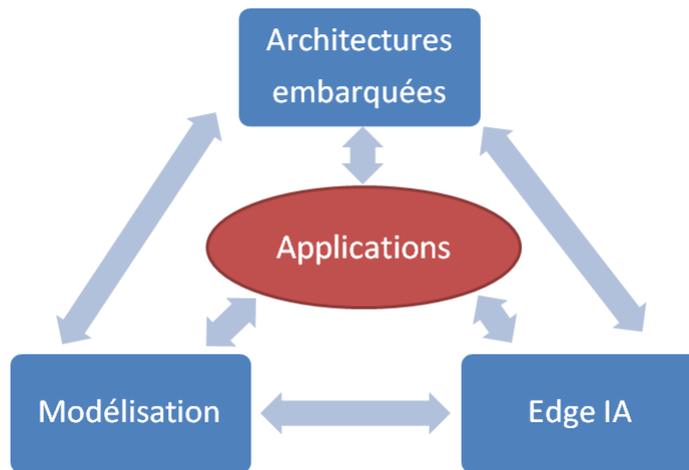
Mots clés : *Systèmes embarqués, edge IA, accélérateurs matériels, capteurs, IA frugale, dispositifs médicaux intelligents, aide au diagnostic, ingénierie biomédicale, modélisation et simulation, systèmes hétérogènes, maintenance prédictive, architectures reconfigurables, systèmes de vision.*

L'équipe SYEL se positionne à la fois sur des aspects fondamentaux et appliqués. Elle se retrouve à la croisée de 3 sections CNU : 63, 61 et 27. D'une part, elle contribue aux avancées fondamentales dans le domaine des systèmes électroniques embarqués intelligents, principalement leur modélisation, architecture et méthodologies pour embarquer des modèles d'apprentissage frugaux et d'inférences. D'autre part, elle exploite ces avancées pour la conception de systèmes dédiés à une classe d'applications, principalement dans les domaines de la santé, du biomédical, de l'aéronautique, de la vision, des transports, de la sécurité et de l'IoT.

L'équipe valide ses travaux fondamentaux par la réalisation de démonstrateurs et leur expérimentation permettant ainsi de valoriser ses contributions sur le plan socio-économique. L'un des points forts de l'équipe est d'avoir une analyse système : les travaux réalisés permettent l'étude de toutes les briques d'un système électronique embarqué. Cela comprend la conception de capteurs, la mise en forme des signaux à l'aide de circuits électroniques analogiques et numériques, la réalisation d'architectures de traitement, le développement de couches logicielles basses et le déploiement sur cibles électroniques matérielles de divers types (CPU, GPU, FPGA et ASIC).s. Plusieurs évolutions structurelles ont marqué l'équipe durant la période 2017-2022.

L'effectif a été consolidé, dans ses activités liées à l'intelligence artificielle frugale, avec l'arrivée de Hichem Sahbi, chargé de recherche au CNRS, en janvier 2022. Il occupe la position de chargé de recherche. Nous notons également le passage du statut de Patrick Garda à émérite après avoir pris sa retraite. D'un autre côté, 2 membres associés de recherches ont rejoint l'équipe. Nathalie Ravidat, maître de conférences à l'Université de Paris Cité. Elle travaille sur des aspects liés à l'architecture du RISC V et (ii) Adrien Ugon, enseignant-chercheur à l'ESIEE, qui mène des travaux qui s'inscrivent dans la conception de systèmes experts basés sur la simulation des raisonnements cognitifs permettant d'abstraire des données granulaires hétérogènes et multimodales.

La figure 1 synthétise l'activité de l'équipe. L'originalité de SYEL est d'étudier divers aspects en lien avec les systèmes embarqués lorsqu'ils sont le plus souvent étudiés par des équipes distinctes. Passons maintenant à une description synthétique des thématiques de recherche de l'équipe durant la période 2017-2022.

FIGURE 1 – Activités de recherche : **Systèmes embarqués intelligents.**

Thème modélisation

L'équipe SYEL étudie la modélisation des performances des systèmes hétérogènes, en particulier l'estimation de la consommation d'énergie et l'intégrité du signal. En ce qui concerne la consommation, l'exigence vis-à-vis de l'autonomie des systèmes embarqués est continuellement croissante. Or, cette autonomie est complexe à estimer dans les phases amont de la conception. En conséquence, sans expérience forte, les choix technologiques et logiciels sont effectués sans que leurs impacts sur l'autonomie du dispositif aient pu être évalués et maîtrisés. Pour répondre à ce problème, nous avons développé un outil permettant d'estimer, très tôt dans le processus de conception, l'autonomie d'un système embarqué. L'outil prend en compte trois aspects : l'application logicielle, l'architecture de la plateforme et la batterie. Une startup a été créée (Wisebatt), la méthodologie a été brevetée, plusieurs cas d'études ont été menés à travers plusieurs collaborations et un dépôt logiciel a été effectué [Dron et al., 2017, Dron et al., 2018]. En septembre 2021, STMicroelectronics a acquis Wisebatt et la PI de Sorbonne Université a été cédée à ST. Actuellement, des travaux sont en cours avec ST, s'appuyant sur l'outil Wisebatt, portant sur le développement d'une méthodologie permettant l'intégration d'algorithmes de "deep learning" dans des systèmes embarqués contraints en énergie.

Du côté de l'intégrité du signal, nous avons collaboré avec la société Atos dans le cadre d'une collaboration CIFRE (thèse de F. Sahel). Atos conçoit des cartes électroniques ultra-denses, qui contiennent des processeurs fonctionnant à très fortes puissances, et des liens séries ultra-rapides. La densité de ces cartes induit un rapprochement inévitable entre des signaux sensibles, et des alimentations à découpage. Cette proximité entraîne des phénomènes de couplage qui peuvent parfois être nuisibles au bon fonctionnement des systèmes électroniques constituant ces cartes. Un prototypage virtuel s'avère nécessaire afin de repérer par simulation les perturbations dues au couplage, et de vérifier l'efficacité des corrections nécessaires à apporter au système pour les réduire. Les outils de CAO actuels ne disposent pas d'application dédiée pour la modélisation de l'impact du fonctionnement d'une alimentation sur son environnement. Pour parer à cette lacune, nous avons proposé une méthode de simulation robuste, permettant de modéliser fidèlement le couplage entre alimentations à découpage et des conducteurs avoisinants, sur des circuits imprimés à haute densité d'interconnexions [Sahel et al., 2021].

Les travaux effectués au sein de l'équipe SYEL sur la modélisation ont abouti à la définition de méthodes fondamentales pour l'aide à la conception de systèmes embarqués.

Thème architecture

Nos travaux de recherches sur les architectures embarquées ont pour objectifs de permettre de mettre en œuvre de manière optimale des algorithmes sur diverses cibles matérielles. L'optimalité s'entend ici en terme de satisfaction de contraintes fonctionnelles et non fonctionnelles. La mesure qui est souvent utilisée pour les contraintes fonctionnelles est la qualité de la réponse de l'algorithme, cette qualité pouvant se mesurer par exemple via un taux de classification. Les contraintes non fonctionnelles que nous étudions, sont le temps de traitement, l'énergie nécessaire au traitement et l'encombrement, notamment en terme de mémoire, de l'algorithme. Ces contraintes peuvent être sévères dans le cadre des applications que nous considérons, qu'elles soient liées au domaine

médical ou à celui du transport. Les cibles matérielles qui sont à la base des mises en œuvre réalisées au sein de l'équipe ; sont des architectures à base de CPU, MCU, DSP, FPGA, GPU. Elle peuvent être hétérogènes en incluant plusieurs types d'architectures précédemment citées. En plus de la satisfaction des contraintes applicatives, nous travaillons à optimiser le temps nécessaire pour mettre en œuvre un prototype à travers une facilité de développement et une flexibilité des solutions proposées pour d'éventuelles futures mises à jour. Les besoins exponentiels pour embarquer divers flux de traitement complexe nous permettent de nous positionner à un nombre important d'appels à projets et contrats industriels.

Dans le projet ANR Winocod, nous nous sommes intéressées à la mise en œuvre d'un réseau sur puce RF dynamiquement reconfigurable pour des architectures many-cœurs (thèse de A.Brière). Le projet a abouti au développement d'un modèle système de l'architecture permettant d'évaluer les apports du RF-NoC et de l'allocation dynamique à la demande de ses bandes de fréquence pour les communications au sein de la puce. La mise en œuvre de stratégies de routage (utilisation du réseau filaire ou du réseau RF selon le type d'échange et la longueur du chemin à traverser) a permis d'optimiser le temps de latence du réseau (20% moins importants que sur un réseau filaire classique) et de repousser le seuil de saturation du réseau [Romera et al., 2019]

Afin de répondre aux contraintes fonctionnelles et non fonctionnelles, nous nous intéressons depuis plus de 20 ans aux architectures reconfigurables. Une première architecture, OLLAF a été réalisée pour optimiser le temps de reconfiguration dynamique. Puis depuis 2012, l'équipe SYEL étudie la parallélisation distribuées de tâches matérielle en utilisant le standard MPI. Ces études ont permis la définition de la plate-forme MATIP. Celle-ci permet de déployer des applications parallèles distribuées composées de tâches matérielles. Pour permettre une utilisation optimale de MATIP, une méthodologie de conception utilisant de la synthèse de haut niveau (HLS) a été proposée et mise en œuvre [Mba et al., 2022]. Cette méthodologie a été utilisée pour intégrer un algorithme d'extraction de caractéristiques pour la reconnaissance de mots d'une langue à tons dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Yaoundé1.

Un des axes de recherche que nous menons au sein de l'équipe SYEL sur les architectures concerne aussi les aspects de méthodologie de déploiement, notamment pour permettre l'embarquabilité d'applications utilisant d'intelligence artificielle. Ces méthodologies sont importantes dans le cadre de l'IA Frugale. Dans le cadre du projet ZIP-CNN (thèse de T.Garbay), une méthodologie d'exploration de l'espace des solutions pour guider l'intégration des CNN au sein de systèmes basés sur des MCU a été définie. Nous utilisons en premier lieu une méthode de transfert de connaissance en utilisant un CNN dont les paramètres ont déjà été appris sur une grande base de donnée et nous les adaptons à l'application embarquée. La méthodologie, utilise ensuite une estimation que nous nommons EST pour Energie-Surface-Temps [Garbay et al., 2022], qui permet de mesurer l'impact de l'exécution du CNN sur le système embarqué. Elle tient compte des caractéristiques intrinsèques du MCU considéré et du CNN à mettre en œuvre. Elle permet d'estimer l'influence des choix de conception et notamment les techniques de réduction, élagage, quantification ou distillation, utilisée pour intégrer le CNN dans l'objectif de respecter des contraintes.

Thème edge IA

Cette thématique s'est consolidée dans l'équipe avec l'arrivée de Hichem Sahbi. L'utilisation de l'IA a permis de résoudre de nombreuses problématiques de vision ou de traitement du langage naturel. Le déploiement de ces modèles permet d'améliorer significativement l'exploitation des données récoltées. Cependant le coût d'exécution de ces algorithmes rend leur implémentation complexe au sein de systèmes embarqués. Plusieurs projets sont aujourd'hui menés au sein de l'équipe SYEL avec l'appui de SCAI. De nombreuses pistes sont étudiées, incluant les systèmes d'IA peu ou non supervisés, à apprentissage continu, ou légers. Quelques exemples de projets sont cités dans la suite de cette section.

D'abord nous soulignons une collaboration dans le cadre d'une thèse CIFRE avec Netatmo (thèse R. Dupont) Ces travaux visent à mettre en place des méthodes de compression et d'accélération des réseaux de neurones profonds. La démarche employée est basée sur l'élagage des connexions neuronales à l'aide de plusieurs critères (par magnitude, en modélisant explicitement la latence, en exploitant des contraintes d'orthogonalité et de consistance topologique, etc.). Les applications en classification d'images et d'actions en vidéos ont permis d'obtenir des taux d'élagage très élevés tout en maintenant une précision proche des réseaux de neurones initiaux non élagués [Dupont et al., 2022].

Une deuxième illustration de nos activités concerne l'apprentissage frugal actif et continu (Thèse S. Deschamps). Une collaboration avec Thales a été initiée dans l'objectif de construire itérativement des modèles d'apprentissage frugaux en données annotées. Nous avons réalisé cela à l'aide de fonctions d'acquisitions permettant de sélectionner un pool de données d'apprentissage le plus petit possible dont l'usage — lors de l'entraînement des

réseaux de neurones — permet d'obtenir des performances comparables à un apprentissage totalement supervisé. Le deuxième objectif est d'apprendre des réseaux de neurones en ingérant frugalement des incréments de données (comme en streaming). L'un des problèmes de l'apprentissage continu est l'oubli catastrophique caractérisé par l'incapacité d'un réseau à mémoriser les anciennes tâches lorsqu'il est entraîné sur de nouvelles. Nous avons ainsi mis en place des solutions permettant d'atténuer l'oubli catastrophique en apprenant les paramètres des réseaux de neurones dans des espaces orthogonaux par rapport aux données des anciennes tâches, ce qui a permis de réduire significativement l'interférence entre les paramètres des différentes tâches en classification d'images [Deschamps and Sahbi, 2022]

Une autre collaboration a été lancée en 2022 avec Essilor à travers une CIFRE (Thèse de L.Demagh). Le sujet porte sur la mesure, identification et discrimination des contextes porteurs à travers une monture de lunettes de port quotidien. Nous avons développé un modèle d'apprentissage profond multimodal et multitâche adapté pour microcontrôleurs basse consommation, appelé TinyMM. Notre proposition combine plusieurs sources de données hétérogènes pour résoudre des tâches distinctes à la fois.

Pour résumer, l'objectif de ces divers projets est de creuser de nouvelles pistes pour diminuer la taille des modèles d'inférences. Le couplage de ces techniques avec l'utilisation d'approches d'accélération matérielles dédiées et des méthodologies d'adéquation algorithme architecture permet de faire des percées profondes dans divers domaines d'applications. 3 domaines d'applications ont été principalement ciblés par l'équipe : le biomédical, systèmes de vision, la fiabilité/sécurité. Un aperçu de quelques projets menés au cours des 6 dernières années est présenté dans la suite de ce document.

Domaines applicatifs

Biomédical/e-santé. L'équipe SYEL a depuis plusieurs années, une forte activité dans les domaines du biomédical et la e-santé. Elle a été développée grâce à des collaborations avec les praticiens des hôpitaux de l'APHP, principalement des CHU de Sorbonne Université. Ces dispositifs et systèmes, doivent aider au diagnostique, voire en réaliser une partie, ils intègrent tous de l'intelligence artificielle. A travers les différentes actions de recherche que nous menons, nous sommes amenés à considérer tous les aspects liés à leur mise en place. Ces aspects concernent la conception des blocs matériels et logiciel embarqué, mais aussi des aspects de certification. Vu l'importante activité de l'équipe dans ce domaine, 3 projets ciblant le biomédical sont détaillés dans le portfolio de l'équipe. D'abord les projets SpinalCOM/SpinalMED avec l'objectif de faire un monitoring fonctionnel de la moelle épinière. Les recherches menées sont associées à des aspects matériels et logiciels, validés in-vivo, ex-vivo, in-vitro ou/et in-silico. Ensuite, les projets portant sur l'analyse du sommeil qui permettent d'étudier les troubles du sommeil à travers la conception de systèmes d'aide à la décision par l'utilisation d'approches d'intelligence artificielle et notamment de système de fusion symbolique. Le troisième élément présenté dans le portfolio concerne la réalisation d'une capsule endoscopique intelligente autonome. Il s'agit ici d'étudier la conception d'un médicament électronique capable de prévenir le cancer colorectal [Chuquimia et al., 2020].

Systèmes de vision. Durant les 20 dernières années, l'équipe a développé un savoir-faire large en partant de la conception de capteurs d'images jusqu'à la mise en place d'algorithmes de compression et de traitement d'image. Dans la continuité de ces travaux, plusieurs projets sont menés en collaboration avec des partenaires industriels. Nous citons notamment une collaboration avec ST dans le cadre d'une CIFRE (thèse de V.Rebière). Nous avons conçu une chaîne de traitement pour la reconstruction spatiale d'une image RGB et de la carte de profondeur (Z) par télémétrie à partir d'une nouvelle architecture matérielle d'imageur monolithique, intégrant sur le même circuit les deux types de capteurs RGB et Z. L'apport majeur de la thèse se trouve dans la conception d'un nouvel algorithme pour la reconstruction des pixels couleurs en raison de la présence des pixels Z dans le motif constituant l'imageur [Rebiere et al., 2020].

Sous un autre aspect lié à l'estimation et classification du mouvement en vidéo, nous avons mis en place des méthodes d'estimation du mouvement (flux optique) dans les séquences vidéos à l'aide des réseaux de neurones profonds entraînés en mode auto-supervisé (c'est-à-dire en étant frugaux aux annotations). Ces travaux se déroulent dans le cadre d'une collaboration avec le CEA LIST (thèse CIFRE de R. Marsal). Une des contributions proposées porte sur une méthode originale permettant d'estimer le flux optique en prenant en compte les changements d'illumination dans les scènes traitées. Un deuxième apport concerne la classification et la reconnaissance d'actions dans les séquences vidéos à l'aide des réseaux convolutifs légers sur des graphes.

Globalement, l'équipe SYEL dispose d'une grande expertise dans ce domaine applicatif. Nous continuons à fructifier le savoir-faire acquis à travers diverses collaborations surtout avec des partenaires industrielles.

Fiabilité/sécurité. L'équipe SYEL a commencé par s'intéresser au thème fiabilité/sécurité en 2014 suite au lancement d'une collaboration avec Thales Avionic qui a été clôturée en 2017. L'objectif était d'introduire un nouveau

type de surveillance basée sur la simulation embarqué pour des systèmes complexes (avions) afin d'optimiser les performances de la sûreté de fonctionnement. En 2020, nous avons relancé cette thématique à travers une collaboration avec Airbus Hélicopters (thèse CIFRE de C. Del Cistia-Gallimard). Nous étudions l'apport et la mise en œuvre de techniques d'intelligence artificielle pour effectuer de la maintenance prédictive sur des pièces d'un hélicoptère. En nous appuyant sur des algorithmes de ML, nous avons proposé d'estimer les efforts agissants sur les pièces de l'hélicoptère en calculant d'endommagement des pièces à partir de l'évolution des charges de vols chez les clients [Del Cistia Gallimard et al., 2022].

Toujours sur cette même thématique, nous menons actuellement deux projets. Le premier porte sur l'interprétation d'un bitstream d'un FPGA par IA en collaboration avec l'université de Toronto et l'université de Nantes (thèse de S. Takougang). Notre ambition est d'interpréter la sémantique d'un bitstream afin de reconnaître les fonctions logiques combinatoires et séquentielles sans connaître à priori l'architecture souhaitée. Cela permettrait de pouvoir identifier des circuits malveillants et de sécuriser l'utilisation des FPGA dans le Cloud. Le deuxième projet se déroule dans le cadre d'une collaboration avec Polytechnique Montréal (thèse de J. Ehmer), pour une application de détection d'attaques de réseau. Nous avons pu montrer lors de ces travaux l'intérêt d'utiliser des réseaux de neurones de faible complexité par rapport à des architectures de type DNN, non seulement en termes de complexité matérielle, mais également en termes d'efficacité pour la reconnaissance des attaques. Ces travaux ont mené à la mise en œuvre d'une fonction de coût optimisée et adaptée à un dataset fortement déséquilibrée.

Globalement, le domaine de la sécurité/fiabilité présente un enjeu majeur pour les systèmes embarqués de demain et l'équipe SYEL est consciente de l'importance de bien se positionner sur un axe de recherche porteur et stratégique pour le LIP6.

2 INTRODUCTION DU PORTFOLIO

L'équipe SYEL présente 4 éléments dans le portfolio :

- ▶ **Élément 1 (publication)** : SpinalCom, portant sur la réalisation d'un implant intelligent pour le monitoring de la moelle épinière, il a été un modèle multidomaine du capteur de monitoring (incluant ses fonctionnalités optiques, électroniques et informatiques) interagissant avec un modèle du milieu biologique (moelle épinière) dans lequel le système est plongé. Ce modèle permet de mettre en place campagnes de simulations précises et en ligne avec des expérimentations in-vitro et in-vivo, et ainsi d'évaluer le comportement du capteur selon différents types de fonctionnements, mais aussi selon son interaction avec différents profils de moelle épinière (patient avec une lésion de la moelle).
- ▶ **Élément 2 (projet ou collaboration)** : Sommeil, l'analyse et exploration a pour objectif d'évaluer la présence de troubles du sommeil et de les quantifier. L'interprétation des données polysomnographiques (acquises lors de l'examen « médical » du sommeil) est une tâche chronophage et peut être accompagnée d'erreurs. Les travaux décrits à travers ce portfolio s'intéressent à la conception de systèmes d'aide à la décision en santé par l'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle ou d'ingénierie des connaissances. Ces travaux se font en collaboration avec des professionnels de santé (médecins généralistes, médecins spécialistes, patients ...) avec lesquels nous travaillons pour analyser un dossier médical et prendre une décision (diagnostic ou thérapeutique).
- ▶ **Élément 3 (publication)** : Cyclope, un capsule endoscopique intelligente avec un intérêt à la définition d'algorithmes et leur intégration sur un système embarqué pour la détection des polypes dans les images de l'intestin. Le mélange de différentes approches (SVM, adaboost, réseau profond et forêts floues) est exploré afin d'obtenir une sensibilité et une spécificité pour la détection des polypes supérieure à 90 %. La définition d'une architecture matérielle embarquée pour l'implémentation de ces algorithmes a pour défi la minimisation de la consommation d'énergie.
- ▶ **Élément 4 (publication)** : Edge intelligence, qui adresse les problématiques liées aux déploiements de modèles d'intelligences artificielles sur des cibles embarquées disposant de ressources très limitées. Notre enjeu est d'apporter de nouvelles méthodologies permettant de faciliter cette intégration au regard des contraintes imposées par le système embarqué. L'IA on the edge est un axe de recherche très prometteur et représenterait un potentiel économique majeur pour les dix prochaines années.

3 AUTOÉVALUATION DU BILAN

3.1 Autoévaluation de l'équipe

Domaine 2. Attractivité

Référence 1. L'unité est attractive par son rayonnement scientifique et s'insère dans l'espace européen de la recherche.

Nous avons participé à l'organisation de plusieurs colloques, conférences et journées de recherche. Nous évoquons notamment le colloque GDR SOC 2 en 2018, l'école thématique franco-canadienne BIOMEDInnov en 2018 et 2019, JetSan 2019, ICECS 2023, 3 journées thématiques "Systèmes embarqués et développement durable" du GDR SoC2 et plusieurs séminaires internes à Sorbonne (Sleep Disorders Day, etc).

Plusieurs membres de l'équipe sont "program chair" et "organisation chair" de conférences. Nous citons notamment la conférence "Medical Informatics Europe" 2022 et DASIP 2021. Nous faisons partie également du comité scientifique de plusieurs conférences tel que IEEE ICECS, IEEE NEWCAS, IEEE EMBC, IEEE BHI, IEEE ISCAS, Jetsan, Biocomp, ISIS, Ondes et réparer l'humain et nous participons aux comités de lecture de revues/conférences tels que IEEE Transaction on Biomedical Engineering, sensor journal, journal of Biomedical and Health Informatics, Microelectronics journal, expert Systems with Applications, Informatics in Medicine, journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, journals of Real-Time Image Processing.

Côté animation et responsabilités de recherche, nous mentionnons la présidence du comité d'animation du GDR SoC2 du CNRS depuis 2022, la co-animation du thème de l'année "Sustainable SOC" en 2019-20, la participation au réseau JU KDT pour l'INS2I en tant que chargé de mission et notre contribution au groupe de travail GT Stim dans le domaine de valorisation stratégique des dispositifs médicaux. Nous avons été invité pour présenter le projet WiNoCod à la journée thématique Emerging Interconnect Technologies du GDR SoC2 en 2017 et l'équipe a obtenu 2 prix. D'abord le Silver award de l'EIT Health PhD Transition Fellowship en 2018 et le Prix de thèse en GBM (Génie Biologique et Médical) en 2019. Le rayonnement de l'équipe fait que ses membres sont souvent sollicités pour participer comme expert dans le cadre à divers appels à projets (ANR, EIT, le programme Discovery Grant canadien).

Pour finir, nous soulignons que plusieurs chercheurs ont été invités et accueillis dans nos locaux durant les 6 dernières années ce qui nous a permis d'amorcer plusieurs collaborations. Les plus récentes visites sont celles de Pierre Langlois, professeur à l'école polytechnique de Montréal et Kryjak Tomasz de l'AGH university of Science and Technology.

Référence 2. L'unité est attractive par la qualité de sa politique d'accompagnement des personnels.

SYEL a vu sa capacité d'encadrer des doctorants augmenter rapidement avec 3 HDR soutenus et un CR HDR qui a intégré l'équipe. L'équipe est attractive en termes de thématique de recherche et les compétences acquises dans le domaine de l'embarqué sont très recherchées par les industriels. Nous dénombrons aujourd'hui 13 doctorants en cours de thèse dont une bonne partie en financement CIFRE. Au niveau de l'équipe, nous animons une veille sur l'actualité scientifique et organisons des présentations mensuelles des travaux de thèse des doctorants suivies d'un brainstorming. Nous encourageons et prenons en charge la participation de tous les doctorants de l'équipe pour participer aux journées annuelles du GDR SOC2 à fin qu'il puisse échanger avec les académiques/industriels et construire leur propre réseau.

Le devenir des nouveaux docteurs de l'équipe est plutôt radieux. Le pourcentage des doctorants qui ont directement pu trouver un travail est écrasant. Il convient de remarquer qu'une bonne majorité travaille dans de grands groupes et des PME, quelque uns ont créé leur propre startup et le reste ont continué dans le domaine de la recherche/enseignement. À titre d'illustration nous citons le recrutement de L. Songin chez Huwaei, F.Sahel chez Atos-Bull, J.Vincent chez ST Microelectronics, O.Quentin chez Naval Group ou A.Brière en tant que enseignant chercheur à l'ESIEE.

Référence 3. L'unité est attractive par la reconnaissance de ses succès à des appels à projets compétitifs.

L'équipe SYEL a obtenu divers financements à travers des appels à projets compétitifs. Nous notons spécifiquement l'ANR Labcom, Le PEPR IA, l'ANR WiNoCoD et le DIM RFSI ZIP CNN. Nous soulignons également l'acceptation

de plusieurs de nos demandes pour la prématuration et la maturation de projets par la SAAT lutech (capsule endoscopique) et le CNRS (Bodycap).

Référence 4. L'unité est attractive par la qualité de ses équipements et de ses compétences techniques.

L'équipe SYEL utilise la plateforme électronique du LIP6. Cette plateforme nous a permis de mettre en place un dispositif d'analyse et de profiling énergétique pour évaluer avec précision l'autonomie des systèmes embarqués et pouvoir l'optimiser. Une autre plateforme importante pour l'équipe est celle de spectroscopie optique visible et proche infra-rouge. Elle sert notamment à la caractérisation de sources lumineuses, de photodétecteurs, ainsi que de média.

Domaine 3. Production scientifique

SYEL, Évolution des publications (2017–2022)

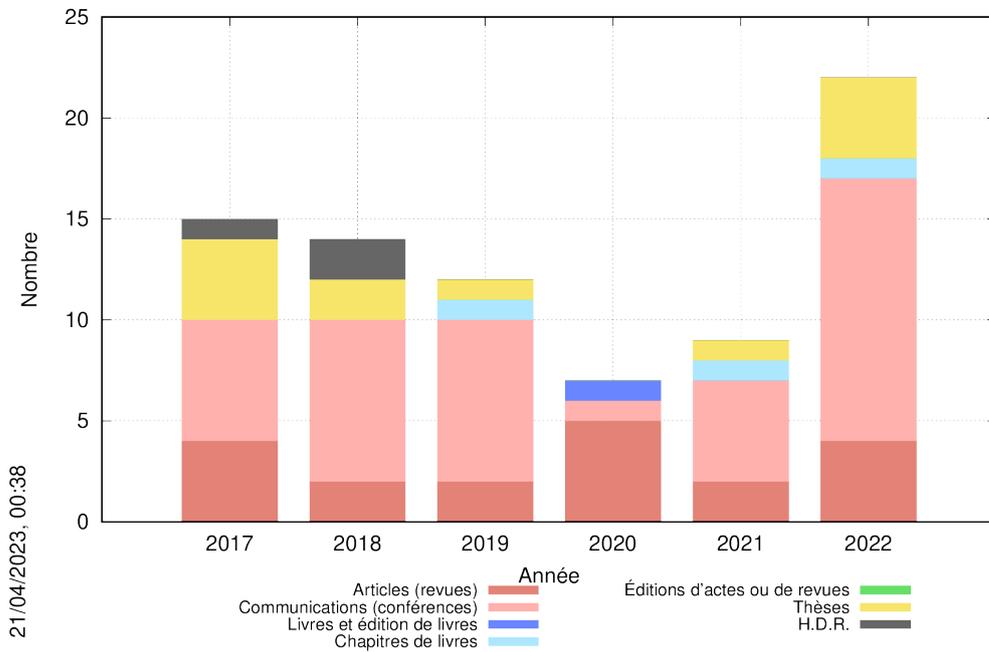


FIGURE 2 – Évolution des publications entre 2017 et 2022

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Articles (revues)	1.00	0.50	0.50	1.42	0.57	0.88
Communications (conférences)	1.50	2.00	2.00	0.28	1.42	2.88

TABLE 2 – Publications par ETPR par an entre 2017 et 2022

Référence 1. La production scientifique de l'unité satisfait à des critères de qualité.

La production scientifique de l'équipe a connu une hausse en termes de nombre d'articles publiés dans des revues et une baisse au niveau du nombre de conférences, due essentiellement à la crise sanitaire. Nous avons publié dans des revues de renommé tels que IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, Journal of Real-Time Image Processing, IEEE Access, IEEE Transactions on Multimedia, IEEE Sensors ou journal of signal processing Systems. En ce qui concerne les conférences, nous avons publié dans plusieurs conférences internationales de premiers plans tels que BIO-CAS 2022, ICIP 2022, EMBS 2021, ICES 2021, IJCNN 2018, COMPAS 2018 ou BHI 2017. L'équipe donne une importance également au dépôts logiciels avec un total de 3 dépôts durant la période écoulée.

Référence 2. La production scientifique de l'unité est proportionnée à son potentiel de recherche et correctement répartie entre ses personnels.

La Figure 2 montre une bonne production scientifique de l'équipe SYEL durant la période 2022-2027. Nous notons un creux en 2020 et 2021 dû essentiellement à la crise sanitaire et une reprise forte en 2022 en raison des travaux d'expérimentations et de prototypages qui ont été retardés. D'une manière globale, les membres de l'équipe sont actifs dans la recherche et, à la fois, très impliqués dans diverses responsabilités de formations proposés par Sorbonne université.

Référence 3. La production scientifique de l'unité respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte. Elle est conforme aux directives applicables dans ce domaine.

L'équipe a publié en "open access" plus de 75 % de ses articles sur HAL et les membres de l'équipe utilisent régulièrement ce portail pour accroître l'accessibilité des publications.

Domaine 4. Inscription des activités de recherche dans la société

Référence 1. L'unité se distingue par la qualité et la quantité de ses interactions avec le monde non-académique.

En déployant une démarche attractive sur le plan scientifique et technologique, l'équipe SYEL réussit régulièrement à accueillir des doctorants dans le cadre de contrats CIFRE proposés par de grandes entreprises telles que Airbus, Thalès St microelectronics ou Essilor. Également, nous notons que plusieurs membres de SYEL sont tuteurs académiques d'étudiants en formations par alternance ou en stage de master 2 avec des industriels qui donnent lieu parfois à des collaborations en retour. Nous notons finalement qu'un membre de l'équipe est chargé de mission "Club des partenaires industriels" au sein du GDR SoC2, ce qui nous aide à améliorer nos interactions.

Référence 2. L'unité développe des produits à destination du monde culturel, économique et social.

Les membres de SYEL sont très impliqués à travers diverses prises de responsabilités à tous les niveaux. Nous notons principalement :

- ▶ la direction du collège doctoral¹ de Sorbonne Université,
- ▶ la direction des études de la licence d'Électronique à Sorbonne Université,
- ▶ la responsabilité du portail de L1 Sciences de l'ingénieur à Sorbonne Université,
- ▶ la responsable de la spécialité Electronique-Informatique parcours Informatique industrielle de Polytech Sorbonne (jusqu'à 2021),
- ▶ la responsabilité du DEUST Systèmes d'Information numérique et électronique (jusqu'à septembre 2021),
- ▶ la responsabilité du parcours de Licence bi-disciplinaire intensif EEA/Informatique et la co-responsabilité du CMI EEA.

Plusieurs membres de l'équipe font partie du conseil d'enseignement de l'UFR d'Ingénierie, du conseil de la Plateforme pédagogique d'Ingénierie.

Référence 3. L'unité partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

L'équipe SYEL contribue activement au partage des connaissances avec le grand public. Chaque année, les membres de SYEL participent à l'organisation de la fête de la science, un événement qui célèbre le partage des sciences. Nous notons que nous proposons plusieurs stages de 3e chaque année, permettant à des collégiens de découvrir le monde de la recherche et que nous avons également écrit plusieurs articles de vulgarisation scientifique. À titre d'exemple, nous pouvons citer l'article de O.Tsiakaka portant sur le monitoring de la moelle épinière.

1. Le collège doctoral réunit l'ensemble des écoles doctorales de sorbonne Université

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES SIGNIFICATIVES DE SYEL

- [Chuquimia et al., 2020] Chuquimia, O., Pinna, A., Dray, X., and Granado, B. (2020). A Low Power and Real-Time Architecture for Hough Transform Processing Integration in a Full HD-Wireless Capsule Endoscopy. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 14(4) :646–657.
- [Del Cistia Gallimard et al., 2022] Del Cistia Gallimard, C., Beroul, F., Denoulet, J., Nikolajevic, K., Pinna, A., Granado, B., and Marsala, C. (2022). Harmonic Decomposition to Estimate Periodic Signals using Machine Learning Algorithms : Application to Helicopter Loads. In *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Padua, Italy.
- [Deschamps and Sahbi, 2022] Deschamps, S. and Sahbi, H. (2022). Reinforcement-based Display Selection for Frugal Learning. In *International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Montréal, Canada.
- [Dron et al., 2017] Dron, w., Hachicha, K., and Garda, P. (2017). Simulation method of the functionality of an electronic circuit and program. Brevet Européen n° 16741563.7-1224, Extension aux USA US20180203957A1 en 2018.
- [Dron et al., 2018] Dron, w., Hachicha, K., and Garda, P. (2018). Estimate, un outil de simulation et d'assistance à la conception. enregistré sous le numéro : IDN.FR.001.030020.000.S.P.2018.000.10000, Délivré par l'agence nationale pour la protection des programmes.
- [Dupont et al., 2022] Dupont, R., Alaoui, M. A., Sahbi, H., and Lebois, A. (2022). EXTRACTING EFFECTIVE SUBNETWORKS WITH GUMBEL-SOFTMAX. In *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 931–935, Bordeaux, France. IEEE.
- [Garbay et al., 2022] Garbay, T., Hachicha, K., Dobiáš, P., Dron, W., Lusich, P., Khalis, I., Pinna, A., and Granado, B. (2022). Accurate Estimation of the CNN Inference Cost for TinyML Devices. In *35th IEEE INTERNATIONAL SYSTEM-ON-CHIP CONFERENCE*, Belfast, Ireland.
- [Mba et al., 2022] Mba, M. L., Gamom Ngounou Ewo, R. C., Denoulet, J., Melatagia Yonta, P., and Granado, B. (2022). An efficient FPGA overlay for MPI-2 RMA parallel applications. In *2022 20th IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS)*, pages 412–416, Québec, Canada. IEEE.
- [Rebiere et al., 2020] Rebiere, V., Drouot, A., Granado, B., Bourge, A., and Pinna, A. (2020). Semi-Gradient for Color Pixel Reconstruction in a RGBZ CMOS Sensor. In *IEEE Sensors 2020*, pages 1–4, Rotterdam (virtual), Netherlands. IEEE.
- [Romera et al., 2019] Romera, T., Brière, A., and Denoulet, J. (2019). Dynamically Reconfigurable RF-NoC with Distance-Aware Routing Algorithm. In *14th International Symposium on Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC 2019)*, York, United Kingdom.
- [Sahel et al., 2021] Sahel, F., Guilbault, P., Vallette, F., and Feruglio, S. (2021). A Crosstalk Modelling Method between a Power Supply and a Nearby Signal in High-density Interconnection PCBs. In *2021 22nd International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)*, pages 227–232, Santa Clara, CA, United States. IEEE.

A ANNEXE — MEMBRES PERMANENTS AU 31/12/2022

La table ci dessous liste les membres permanents de l'équipe SYEL.

NOM	Prénom	Corps	Employeur
ALEXANDRE	Annick	MCF	Sorbonne Université
DENOULET	Julien	MCF	Sorbonne Université
FERUGLIO	Sylvain	MCF (HDR)	Sorbonne Université
GRANADO	Bertrand	PR	Sorbonne Université
HACHICHA	Khalil	MCF (HDR)	Sorbonne Université
PINNA	Andrea	MCF (HDR)	Sorbonne Université
SAHBI	Hichem	CR (HDR)	CNRS
VALLETTE	Farouk	MCF	Sorbonne Université

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 01



Publication

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : SpinalCOM

URL de l'élément : <https://hal.science/hal-01782182>

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Le projet SpinalCOM est un projet de recherche transdisciplinaire en ingénierie biomédical présentant des développements matériels et logiciels, associés à des expérimentations in-vivo (modèle porcin, suite à l'obtention des autorisations nécessaires), ex-vivo (sur fantôme et tissus biologiques), in-vitro (grâce au déploiement d'un banc de test) et in-silico (via notamment la modélisation du dispositif dans son environnement, dans une perspective plus large de prototypage virtuel). Dans sa forme actuelle, SpinalCOM se propose de répondre à une réelle problématique de sûreté et de sécurité en per-opératoire, lors d'une chirurgie du rachis, grâce au monitoring en temps réel de l'état fonctionnel de la Moelle épinière (ME). Le projet SpinalCOM s'appuie sur des résultats significatifs acquis, notamment grâce à des expérimentations concluantes sur le gros animal. Nous dénombrons 2 demandes d'autorisation pour des expérimentations animales (saisines) auprès de comités d'éthiques sur la période (ENVA/MESRI 20191 et 20222)

La caractérisation optique de la ME a été réalisée dans différentes configurations et la preuve de faisabilité de ce type de mesure a été faite grâce à des dispositifs développés au LIP6. Deux thèses ont été soutenue sur le sujet en 2018 (Olivier TSIKAKA) et 2022 (Songlin LI). De plus, lors de l'année 2021-22, suite au soutien de l'UIS, un médecin a été recruté pendant 12 mois au sein du laboratoire, en collaboration avec l'hôpital Armand-Trousseau. Pour faire suite aux actions fructueuses engendrées, un projet de maturation CNRS est en cours d'écriture et deux nouveaux projets de recherche en collaboration avec la médecine ont été initiée. Nous mentionnons également que le projet spinalCOM a obtenu le sliver Award de l'EIT Health en 2018. Le bilan scientifique est de 2 revues et 2 conférences internationales et un article de vulgarisation scientifique.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

La ME représente l'entrée des informations sensorielles et la sortie des commandes motrices des membres et du tronc. Son atteinte par des traumatismes ou par des pathologies de nature inflammatoire ou neurodégénérative entraîne des conséquences sensorielles et motrices majeures qui affectent la qualité et l'espérance de vie des patients. La prévalence de ces pathologies est de 28 000 nouveaux cas par an pour l'Europe des 49 pays et 12 000 pour les USA. C'est un marché de plusieurs millions de d'euros, stimulé par le vieillissement de la population et le mode de vie urbain.

La prise en charge des pathologies de la colonne vertébrale et de la ME nécessitent fréquemment de recourir à des interventions chirurgicales. Dans ce cas, le placement d'implants métalliques au plus proche de la ME, la correction de l'anatomie de la colonne vertébrale (suite à une scoliose, par exemple) ou la chirurgie directe de la ME comportent un risque significatif de complications neurologiques et de paralysie transitoire ou définitive des membres. Bien que le risque soit faible, la surveillance des Potentiels Evoqués (PE) est un standard pour toutes corrections liées au rachis.

Cette technique permet de savoir à chaque instant de l'intervention si la fonction de la ME reste bonne et si les contraintes exercées sur la colonne vertébrale sont bien tolérées par les structures nerveuses qui cheminent en son sein. Dans les cas où la fonction de la ME est perturbée par la correction chirurgicale, il est alors possible de diminuer l'importance de la correction pour éviter toute survenue de paralysie au niveau des membres inférieurs. Il s'agit donc d'une technique très importante pour la surveillance des patients durant l'intervention chirurgicale. A ce jour, le monitoring des PE est la seule technique per-opératoire disponible qui permet d'avoir des informations indirectes sur l'état fonctionnel de la ME et donc la stabilité de sa fonction.

Cependant, cette méthode ne permet pas toujours d'identifier un dysfonctionnement métabolique précoce, notamment liées à des phénomènes vasculaires, avant que les fonctions neurologiques ne soient affectées. Pour le moment, il n'existe pas de technique d'imagerie (IRM, échographie doppler ou autre) permettant d'avoir accès en temps réel aux données sur l'état fonctionnel de la ME (e.g., variation temporelle du niveau de perfusion tissulaire). En effet, la majorité des complications neurologiques qui surviennent lors des corrections chirurgicales des déformations de la colonne vertébrale sont d'origine vasculaire (ischémies de la ME) [2]. Il nous paraît donc particulièrement pertinent de proposer un système pour le recueil métabolique en temps réel et l'expression d'une métrique qui pourra aider le chirurgien dans sa prise de décision. Cela permettrait, par exemple, au médecin d'adapter l'intensité de la correction à la tolérance à l'ischémie du tissu nerveux. Dans ce contexte, le projet SpinalCOM a pour ambition de concevoir, puis d'expérimenter un nouveau dispositif médical pour le suivi métabolique de la ME en per-opératoire [1, 3, 4].

Ce projet présente deux principaux verrous :

- ▶ La réalisation d'un dispositif à très faible encombrement à haute sensibilité de mesure, robuste et adapté au contexte opératoire (stérilisable et utilisable dans un environnement de bloc opératoire)
- ▶ L'exploitation des données : extraction et traitement des différentes données par rapport aux bruits physiologiques et aux signaux parasites.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Songlin Li, Julien Denoulet, Olivier Tsiakaka, and Sylvain Feruglio. Multi-domain Modeling and Simulation of an Oximeter : PVT Variations Impact of Opto-electronic Devices on the SpO2 Quantification. In *11th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 303–310, Online Streaming, France, July 2021. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
- [2] Nicolas Mainard, Olivier Tsiakaka, Songlin Li, Julien Denoulet, Karim Messaoudene, Raphael Vialle, and Sylvain Feruglio. Intraoperative Optical Monitoring of Spinal Cord Hemodynamics Using Multiwavelength Imaging System. *Sensors*, 22(10) :3840, May 2022.
- [3] Olivier Tsiakaka, Benoit Gosselin, and Sylvain Feruglio. Source–Detector Spectral Pairing-Related Inaccuracies in Pulse Oximetry : Evaluation of the Wavelength Shift. *Sensors*, 20(11) :3302, June 2020.
- [4] Olivier Tsiakaka, Songlin Li, Julien Denoulet, and Sylvain Feruglio. Spinal cord monitoring by NIRS in reflection and transmission modes. In *2021 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, Online, Italy, May 2021. IEEE.

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 02



Projet ou collaboration

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Sommeil : analyse automatique de stades du sommeil et aide au diagnostique

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Le thème de l'analyse et l'exploration du sommeil est un sujet multi-disciplinaire tant au niveau scientifique que au niveau clinique-médicale [1–5]. Pour cela il s'inscrit dans une collaboration au niveau du laboratoire entre plusieurs équipes, l'équipe LFI¹ et l'équipe ACASA². Au niveau clinique-médicale nous avons collaborer avec l'unité du sommeil au sein du Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière, à Paris (faculté des sciences).

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

Trois projets se sont succédé sur ce thème.

3.1 Projet AEP (Automated Embedded Polysomnography, 2014-2018)

L'objectif du projet est d'étudier et de développer un système pour la classification automatique des stades du sommeil et la détection des apnées prenant en compte les artefacts des signaux physiologiques et les caractéristiques de l'individu. La thèse de Mme Chen Chen et les travaux de post-doctorat de M. Adrien Ugon sont associés à ce projet. **Originalité et résultats** : pour rendre le système autonome, nous avons déterminé et évalué avec des techniques d'apprentissage (algorithme évolutif et corrélation croisée) la singularité de l'individu. L'avantage majeur apporté par la formalisation et la fusion symbolique est la possibilité pour le médecin d'être toujours celui qui génère la connaissance formalisée et qui valide le modèle symbolique associé. Dans l'interprétation des signaux physiologiques une collaboration avec Mme Giovanna Morgavi (CR-CNR-Italie) a porté sur la conception d'un système cognitif pour la classification automatique du sommeil basé sur l'exploitation du portrait de phase pour la représentation des grapho-éléments, caractéristiques de l'analyse du sommeil. Dans la continuité de ce projet, une collaboration et une phase de transfert technologique a été réalisé avec la société Bioserenity afin d'évaluer notre logiciel avec les autres solutions du marché pour la classification automatique des stades du sommeil à partir de signaux polysomnographiques. Le projet AEP est aujourd'hui terminé. Bilan : 2 revues, 8 conférences internationales, 4 dépôts logiciels, organisation du séminaire "Sleep Disorders Day : From Functional Exploration to the Management of Sleep Disorders" – Séminaire IUIS Sorbonne Université, 1 base de données, *Gold standard* annotées à l'aveugles par deux cliniciens différents (un pneumologue et un neurologue). Cette base est composée de 200 patients avec des index d'apnée différents et 5 sujets sains observés sur trois nuits consécutives.

3.2 Projet ACAP (Automatic Cycling Alternating Pattern, 2020-2021)

Ce projet porte sur l'analyse de l'instabilité et de la perturbation du sommeil par détection automatique des *cycling alternating pattern* (CAP). Il s'inscrit dans une collaboration avec l'Université de Pise (Italie). Le CAP est un pattern électro-physiologique typique du sommeil non paradoxal (NREM) caractérisé par la répétition de séquences d'événements EEG d'activation et inactivation bien différenciées de l'activité de base. Cette analyse est aujourd'hui la seule mesure pour établir de manière objective la qualité du sommeil et elle est très chronophage pour le médecin. Dans la continuité des travaux sur le projet AEP et à partir d'un ensemble de règles non formelles, l'objectif du projet est de formaliser les critères de lecture des signaux EEG pour l'identification automatique des CAPs par fusion symbolique. Pour la validation nous utilisons la base de données dédiée de PhysioNet (CAP Sleep Database). Ces travaux s'effectuent en collaboration avec Maria-Paola Tramonti Fantozzi, qui a passé une période

1. Learning, Fuzzy and Intelligent systems

2. Agents Cognitifs et Apprentissage Symbolique Automatique

de quatre mois en 2020 comme post-doctorante au sein de l'équipe SYEL en partenariat avec le Dipartimento di Ricerca Traslazionale e delle Nuove Tecnologie in Medicina e Chirurgia de l'Université de Pise et le BioRobotics Institute, Scuola Sant'Anna à Pise (Italie).

L'originalité de ces travaux réside dans le traitement de bas niveau sur les dérivations classiques d'un tracé polysomnographique afin d'appliquer une méthode symbolique qui émule la méthode visuelle du médecin dans l'analyse des tracées EEG. L'approche est globale, au contraire des méthodes existantes qui sont sur une seule dérivation EEG. Le projet ACAP est aujourd'hui terminé. Une nouvelle collaboration en 2023 avec l'Instituto Politécnico Natiocional, Centro de Investigación en Computación, Université Mexique portera sur la détection des CAP par la mise en œuvre des techniques de traitement automatique du langage naturel et de reconnaissance de formes sur les données symboliques. Bilan : 1 revue internationale.

3.3 Projet Émotions et Sommeil (depuis septembre 2020)

Le projet porte sur l'analyse et la reconnaissance automatique des émotions dans les rêves à l'aide du modèle du sommeil paradoxal lucide chez les patients narcoleptiques. La thèse du Dr. Jean-Baptiste Maranci, psychiatre, est à la base de ce projet et il a obtenu un poste d'accueil au LIP6, suite à l'appel à candidatures Postes d'Accueil 2020 pour Assistants Hospitalo-Universitaires, Chefs de Clinique Assistants, Praticiens Hospitaliers Contractuels et Praticiens Hospitaliers, organisé par l'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris (AP-HP). Ce poste d'accueil permettra au Dr. Maranci d'effectuer pendant deux ans une activité de recherche au sein de l'équipe SYEL sous ma supervision. Ce projet s'inscrit dans une nouvelle collaboration avec le Prof. Isabelle Arnulf, chef de service de l'unité du sommeil au sein du Groupe Hospitalier Pitié-Salpêtrière, à Paris.

L'originalité de ces travaux est : i) obtenir pour la première fois la valence émotionnelle d'un rêve sans avoir à réveiller le dormeur et de pouvoir la localiser avec une bonne résolution temporelle sur un tracé polysomnographique ; ii) prédire la valence émotionnelle d'un rêve avec des modèles d'inférence (arbres et forêts floues, SVM4, réseau de neurones (PMC5)) obtenus par apprentissage sur une base de données déjà existante. Les travaux du Dr. Maranci contribueront au transfert de connaissances entre les équipes des deux facultés de Sorbonne Université (Médecine et Science). Bilan : 2 revues internationales (Nature) sont en cours de soumission. 1 base de données annotés avec plus des 30 micro-sommeil de 30 minutes et annotations par rêveur lucide et questionnaire.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Chen Chen, Adrien Ugon, Chenglu Sun, Wei Chen, Carole Philippe, and Andrea Pinna. Towards a hybrid expert system based on sleep event's threshold dependencies for automated personalized sleep staging by combining symbolic fusion and differential evolution algorithm. *IEEE Access*, 7 :1775–1792, 2018.
- [2] Amina Kotti, Adrien Ugon, Karima Sedki, Brigitte Seroussi, Jean-Gabriel Ganascia, Patrick Garda, Jacques Bouaud, Andrea Pinna, Isabelle Arnulf, and Carole Philippe. Nouvelle technique d'analyse automatique des polysomnographies : approche symbolique avec intégration de préférences. *Médecine du Sommeil*, 14(1) :41, 2017. SI : 14/1 - Mars 2017 - Congrès du Sommeil novembre 2016.
- [3] Maria Paola Tramonti Fantozzi, Ugo Faraguna, Adrien Ugon, Gastone Ciuti, and Andrea Pinna. Automatic cyclic alternating pattern (cap) analysis : Local and multi-trace approaches. *Plos one*, 16(12) :e0260984, 2021.
- [4] Adrien Ugon, Amina Kotti, Brigitte Séroussi, Karima Sedki, Jacques Bouaud, Jean-Gabriel Ganascia, Patrick Garda, Carole Philippe, and Andrea Pinna. Knowledge-based decision system for automatic sleep staging using symbolic fusion in a turing machine-like decision process formalizing the sleep medicine guidelines. *Expert Systems with Applications*, 114 :414–427, 2018.
- [5] Adrien Ugon, Carole Philippe, Amina Kotti, Marie-Amélie Dalloz, and Andrea Pinna. Automatic sleep stages classification combining semantic representation and dynamic expert system. In *MEDINFO 2019 : Health and Wellbeing e-Networks for All*, volume 264, pages 848–852, 2019.

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 03



Publication

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : Cyclope

URL de l'élément : <https://hal.science/hal-02926839>

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

Le cancer colorectal représente la deuxième cause de mortalité par cancer dans les pays industrialisés (30000 décès par an selon l'OMS). En France, on dénombre chaque année plus de 39000 nouveaux cas (21000 hommes et 18000 femmes) avec un taux de mortalité de l'ordre de 50%. Le cancer colorectal touche principalement des personnes de plus de 50 ans et dans 80% des cas il se développe à partir d'un polype adénomateux (ou adénome). La capsule Cyclope réponds permet aux médecins de voir l'intérieur de l'intestin grêle, une zone qui n'est pas facilement accessible avec les procédures d'endoscopie plus traditionnelles. Ce projet, interdisciplinaire, est stratégique pour l'équipe SYEL. Il traite à la fois des aspects logiciels et matériels dans des dispositifs embarqués extrêmement contraints et a permis d'amorcer plusieurs collaborations avec des médecins de l'APHP.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

Le risque de transformation d'un adénome en cancer varie en fonction de sa taille et de son architecture tissulaire (nature vilieuse, degré de dysplasie). Ainsi, on considère qu'un adénome est « avancé » (donc à risque élevé de dégénérescence en cancer) lorsque sa taille dépasse 10 mm, lorsqu'un contingent vilieux occupe plus de 25% de sa surface et/ou lorsqu'il contient une zone de dysplasie de haut grade. Le dépistage des lésions adénomateuses à un stade précoce (précancéreux) et l'amélioration des traitements ont permis de réduire le taux de mortalité, mais il reste encore important.

Les vidéocapsules endoscopiques sont apparues en 2001 afin de permettre un examen visuel jusqu'alors impossible des parois de l'intestin dans sa totalité. L'examen est réalisé en ambulatoire (c'est-à-dire sans hospitalisation). Le patient ingère la vidéocapsule colique, après un lavement intestinal comme lors d'une coloscopie et le praticien récupère sous 24h le boîtier d'enregistrement. L'analyse par le praticien de plusieurs centaines de milliers d'images, sous forme d'un film, permet de déceler l'origine des saignements et la présence éventuelle de polypes. Les vidéocapsules possèdent plusieurs limitations de part leur architecture ; les images délivrées permettent d'obtenir une estimation des tailles des lésions avec 50% d'erreur, l'autonomie est limitée à 10 heures, le temps de traitement par le médecin est important et les outils ne permettent pas d'interpréter de façon fiable le caractère précancéreux ou cancéreux des polypes.

L'objectif scientifique de l'équipe Syel est de créer et développer une nouvelle capsule capable de détecter et de reconnaître in-situ des anomalies présentes dans le tube digestif (polypes adénomateux ou non, dysplasiques ou non, vilieux ou non, présence de sang, etc.). Pour se faire, alors que les images issues des capsules actuelles n'apportent que des informations sur la couleur et sur la forme des lésions possibles mais très peu sur leurs dimensions ou leurs rugosités, obligeant dans de nombreux cas à pratiquer des biopsies, nous étudions la possibilité d'une réelle caractérisation tridimensionnelle des données acquises par l'intégration dans la capsule d'une VCSEL associée à un réseau de diffraction. Cette intégration doit permettre la reconstruction du relief des parois de l'intestin à l'aide de méthode de stéréovision active et ainsi avoir une bonne précision sur la mesure des dimensions du relief tout en ayant une reconstruction non dense. Cette méthode permet un traitement en temps réel au sein de la capsule ce qui lui permettra de délivrer une information de relief et d'apporter au praticien des données quantitatives sur des formes 3D classifiées (polypes, kystes, etc.). Ce nouvel outil d'endoscopie permettra de délivrer des informations au praticien qui seront plus fiables, et plus précises (une erreur de moins de 10%, alors qu'aujourd'hui sur les petits polypes l'erreur d'estimation peut aller jusqu'à 100%) que celles délivrées par les capsules existantes, permettant d'affiner les diagnostics en limitant les recours à la chirurgie [1–6].

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Orlando Chuquimia, Bertrand Granado, Xavier Dray, and Andrea Pinna. Hand Crafted Method : ROI Selection and Texture Description. In *Computer-Aided Analysis of Gastrointestinal Videos*, pages 49–58. Springer International Publishing, July 2021.
- [2] Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Xavier Dray, and Bertrand Granado. Polyps Recognition Using Fuzzy Trees. In *BHI-2017 International Conference on Biomedical and Health Informatics*, pages 9–12, Orlando, FL, United States, February 2017. IEEE.
- [3] Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Xavier Dray, and Bertrand Granado. A Real Time Hough Transform Architecture Useable inside a WCE. In *2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, pages 1–4, Nara, Japan, October 2019. IEEE.
- [4] Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Xavier Dray, and Bertrand Granado. Polyp follow-Up in an Intelligent Wireless Capsule Endoscopy. In *2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, pages 1–4, Nara, Japan, October 2019. IEEE.
- [5] Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Xavier Dray, and Bertrand Granado. A Low Power and Real-Time Architecture for Hough Transform Processing Integration in a Full HD-Wireless Capsule Endoscopy. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 14(4) :646–657, August 2020.
- [6] Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Christophe Marsala, Xavier Dray, and Bertrand Granado. FPGA-based Real Time Embedded Hough Transform Architecture for circles detection. In *DASIP 2018 - Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing*, Porto, Portugal, October 2018.

ÉLÉMENT DE PORTFOLIO 04



Publication

1 DÉFINITION DE CET ÉLÉMENT

Titre de l'élément : Edge intelligence

URL de l'élément : <https://hal.science/hal-04042615>

2 MOTIVATIONS DU CHOIX DE CET ÉLÉMENT

L'IA et en particulier les réseaux de neurones profonds ont connu une forte résurgence dès l'année 2012. Il s'agit d'architectures paramétriques multi-couches dotées d'unités neuronales interconnectées. L'avantage majeur de ces architectures réside dans leur capacité à apprendre à représenter les données de manière hiérarchique. L'un des modèles les plus performants est le réseau de neurones convolutif (CNN) et le transformer. Ces modèles ont une particularité : il est observé que plus la précision attendue d'un réseau est élevée, plus sa taille et le nombre de données nécessaires pour l'entraîner deviennent importants. En effet, l'augmentation de la précision des réseaux de neurones a un coût ; à titre d'exemple, le réseau VGG16 nécessite plusieurs millions de paramètres pour réaliser une classification d'image alors que les réseaux transformers GPT les plus récents (en lien avec le succès actuel de ChatGPT) nécessitent des centaines de milliards de paramètres. Ce nombre a un impact sur les systèmes électroniques ou embarqués qui exécutent ces réseaux de neurones : une consommation énergétique importante, un temps d'exécution significatif ainsi qu'un espace mémoire et un nombre de données d'apprentissage nécessaires non-négligeables. Ce constat est acceptable dans le cadre d'utilisation de systèmes comme les gros serveurs de calculs, mais pour des systèmes embarqués qui sont de plus en plus ubiquitaires, cela est problématique. Il est nécessaire de satisfaire la contrainte de précision des réseaux de neurones mais aussi les tailles des ensembles d'apprentissage pour entraîner ces modèles, les contraintes de consommation énergétique, de temps d'exécution et d'espace mémoire.

Une tendance actuelle en apprentissage machine vise à rendre ces modèles frugaux et légers tout en préservant leur haute précision. En effet, la variabilité ou le manque des données annotées nécessite la mise en place de solutions d'apprentissage frugaux en données annotées (notamment actif et continu), comme en biomédicale ou la disponibilité des experts en annotations, à savoir les médecins, est très limitée. De plus les compressions algorithmiques applicables aux réseaux de neurones visent à réduire la taille et l'impact de l'inférence de ces modèles sur les systèmes électroniques. Ces efforts répondent aux besoins d'implémentation d'algorithmes d'analyses puissants au sein d'unités matérielles contraintes et largement déployées dans les applications embarquées, telles que les microcontrôleurs ou les FPGA. D'autre part, la préservation de la vie privée et la sécurité des données nécessitent la mise en place de solutions d'entraînement et d'inférence de ces réseaux de neurones In Situ (i.e. en les appliquant localement sur des dispositifs embarqués), ce qui permet de rassurer les utilisateurs à propos de leurs données personnelles (comme pour les applications domotiques). Les contraintes de transmission sont également importantes notamment pour des applications où la bande passante est faible, voire inexistante, comme pour les missions spatiales lointaines.

Nous avons étudié et développé des solutions originales sur les problèmes susmentionnés (voir exemples de publications [1–11]) et ceci dans le cadre de collaborations bilatérales avec Thales, l'IGN, CEA, Essilor, etc. Ces travaux ont donné lieu à la soutenance de 3 thèses (entre 2018-2020) et d'autres thèses sont en cours.

3 PRÉSENTATION DE CET ÉLÉMENT

Le premier axe de nos travaux concerne l'apprentissage actif dont l'objectif est de construire itérativement des modèles d'apprentissage frugaux en données annotées [1]. Nous avons réalisé cela à l'aide de fonctions d'acquisitions permettant de sélectionner un "pool" de données d'apprentissage le plus petit possible dont l'usage — lors de l'entraînement des réseaux de neurones — permet d'obtenir des performances comparables à un apprentissage totalement supervisé. Le deuxième axe concerne l'apprentissage continu dont l'objectif est d'apprendre des réseaux de neurones en intégrant frugalement des incréments de données (comme en streaming). L'un des

problèmes de l'apprentissage continu est l'oubli catastrophique caractérisé par l'incapacité d'un réseau de neurones à mémoriser les anciennes tâches lorsqu'il est entraîné sur de nouvelles. Dans cet axe de recherche, nous avons mis en place des solutions permettant d'atténuer l'oubli catastrophique [11] en apprenant les paramètres des réseaux de neurones dans des espaces orthogonaux par rapport aux données des anciennes tâches, ce qui permet de réduire significativement l'interférence entre les paramètres des différentes tâches en classification d'images.

Le déploiement de ces solutions sur des dispositifs à bas coût (smartphones, etc) nécessite la compression des réseaux de neurones. Dans cette perspective, nous avons mis en place des méthodes de compression et d'accélération des réseaux de neurones profonds (e.g. [2]). La démarche employée est basée sur l'élagage de connexions neuronales à l'aide de plusieurs critères (par magnitude, en modélisant explicitement la latence, en exploitant des contraintes d'orthogonalité et de consistance topologique, etc.). Les usages en classification d'images et d'actions en vidéos ont permis d'obtenir des taux d'élagage très élevés tout en maintenant une précision proche des réseaux de neurones initiaux non-élagués.

La compression des réseaux de neurones à travers l'application des techniques d'élagage, ou encore de quantification ou de distillation de connaissances engendre une réduction de son coût d'inférence. La réduction en consommation énergétique, temps d'exécution et espace mémoire des réseaux de neurones doit être prise en compte pour respecter au mieux les contraintes des différents cas d'usages utilisant des dispositifs à bas coût. Dans cet objectif, nous avons conçu et évalué un nouveau modèle [4] caractérisant ces contraintes dans le cas de l'implémentation d'un réseau de neurones convolutifs compressé ou non. La démarche a pour objectif de guider les concepteurs de système embarqué au plus tôt dans le processus de conception.

Enfin, nos cas d'usages sont multiples et concernent essentiellement des applications de vision par ordinateur et reconnaissance des formes comme la conduite automatisée, télédétection, vidéosurveillance, etc. L'un des cas d'usages que nous avons étudié concerne l'estimation du mouvement (flux optique) dans les séquences vidéos à l'aide des réseaux de neurones profonds entraînés en mode auto-supervisé [6] (c.a.d. en étant frugaux en annotations). Une des contributions proposées dans ces travaux concerne une méthode originale permettant d'estimer le flux optique en prenant en compte les changements d'illumination dans les scènes traitées. D'autres cas d'usages concernent (i) la vidéosurveillance où nous avons développé des méthodes de reconnaissance d'actions dans les séquences vidéos à l'aide des réseaux convolutifs légers sur des graphes [7], et aussi (ii) l'analyse des séries d'images multi-temporelles en télédétection, et ceci pour la segmentation et l'estimation de l'occupation des sols [9], la classification d'images [5] et des navires [8] ainsi que la détection de zones ayant subi des changements (destructions) suite à des catastrophes naturelles (comme les tornades et les tremblements de terre) [1, 10].

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Sebastien Deschamps and Hichem Sahbi. Reinforcement-based display selection for frugal learning. In *2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pages 1186–1193. IEEE, 2022.
- [2] Robin Dupont, Mohammed Amine Alaoui, Hichem Sahbi, and Alice Lebois. Extracting effective subnetworks with gumbel-softmax. In *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 931–935. IEEE, 2022.
- [3] Thomas Garbay, Orlando Chuquimia, Andrea Pinna, Hichem Sahbi, Xavier Dray, and Bertrand Granado. Distilling the knowledge in cnn for wce screening tool. In *2019 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, pages 19–22. IEEE, 2019.
- [4] Thomas Garbay, Khalil Hachicha, Petr Dobias, Wilfried Dron, Pedro Lusich, Imane Khalis, Andrea Pinna, and Bertrand Granado. Accurate Estimation of the CNN Inference Cost for TinyML Devices. In *2022 IEEE 35th International System-on-Chip Conference (SOCC)*, 2022.
- [5] Mingyuan Jiu and Hichem Sahbi. Nonlinear deep kernel learning for image annotation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(4) :1820–1832, 2017.
- [6] Rémi Marsal, Florian Chabot, Angélique Loesch, and Hichem Sahbi. Brightflow : Brightness-change-aware unsupervised learning of optical flow. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, pages 2061–2070, 2023.
- [7] Ahmed Mazari and Hichem Sahbi. Mlgcn : Multi-laplacian graph convolutional networks for human action recognition. In *The British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2019.
- [8] Quentin Oliveau and Hichem Sahbi. Learning attribute representations for remote sensing ship category classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6) :2830–2840, 2017.

- 
- [9] Tristan Postadjian, Arnaud Le Bris, Hichem Sahbi, and Clément Mallet. Investigating the potential of deep neural networks for large-scale classification of very high resolution satellite images. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4, 2017.
- [10] Hichem Sahbi. Interactive satellite image change detection with context-aware canonical correlation analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5) :607–611, 2017.
- [11] Hichem Sahbi and Haoming Zhan. Ffnb : Forgetting-free neural blocks for deep continual learning. In *The British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2021.