

**Titre en français :**

**MicroCapteurs pour la détection sélective de polluants gazeux : Approche générique, combinant connaissance physique et intelligence artificielle en ligne (l'apprentissage par renforcement) pour la discrimination sélective des gaz.**

**Titre en anglais : Generic approach, combining physical knowledge and online AI tools (reinforcement learning) for selective gas discrimination with metal oxide micro-sensors**

**Nom du directeur de thèse : Dr Mohand DJEZIRI**

**Nom du co-directeur de thèse : Dr Thierry CONTARET**

**Tel : 0669010990**

**E-Mail : mohand.djeziri@univ-amu.fr. Thierry.contaret@univ-amu.fr**

**Laboratoire : IM2NP : Institut Microélectronique, Matériaux et Nanosciences de Provence, UMR CNRS 7334**

**Financement : demandé**

**Type de financement : ED 353**

**Résumé en français :**

Le manque de sélectivité des capteurs MOX est un problème récurrent et d'actualité qui mobilise la communauté scientifique depuis plusieurs années, car il touche plusieurs domaines d'application tels que les transports, l'énergie, la sécurité et la santé. Le développement d'une couche logicielle basée sur les méthodes de l'Intelligence Artificielles (IA) fait partie des axes de recherche les plus prometteurs, visant notamment la proposition de solutions ciblées pour des cas d'application bien définis où le nombre et les types de gaz-cibles sont connus à l'avance.

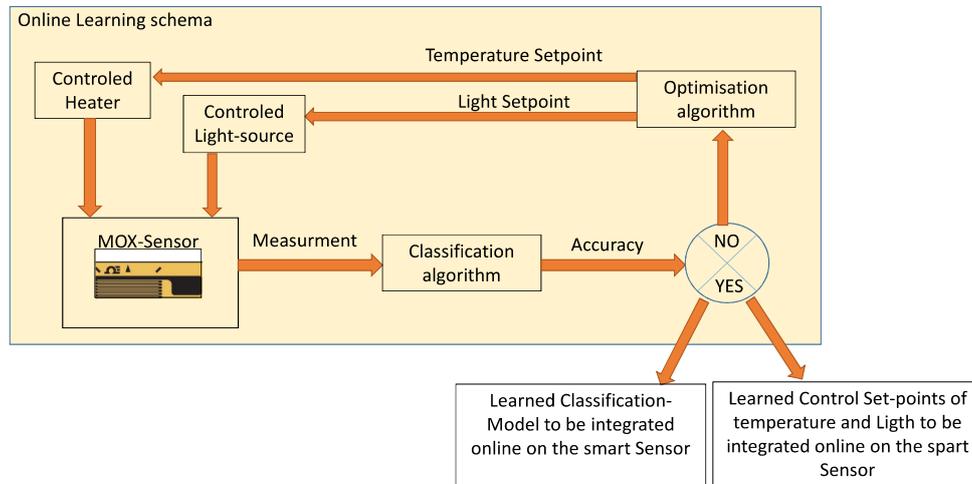
Les études bibliographiques montrent que le problème de sélectivité des capteurs MOX est souvent défini par la communauté scientifique comme un problème d'apprentissage supervisé, et d'un point de vue méthodologique, l'apprentissage automatique et l'apprentissage approfondi sont les plus utilisés, allant des techniques simples comme les KNN et les techniques avancées comme le DCNN, à la combinaisons d'outils tels que LSTM-SVM [1]. Les solutions proposées ont permis d'exploiter

largement les outils existants d'extraction, sélection, classification de données, et prise de décision [2, 3, 4].

Dans l'étape d'extraction, les caractéristiques temporelles et fréquentielles les plus connues ont été extraites et utilisées. De plus, d'autres caractéristiques spécifiques ont été étudiées tels que la réponse dynamique, l'abscisse curviligne, le facteur de forme, le rayon de courbure et la résistance dynamique moyenne. Dans l'étape de sélection des caractéristiques, on constate cependant que contrairement à l'étape d'extraction où une large gamme d'outils a été utilisée, la sélection des caractéristiques n'a pas reçu beaucoup d'attention. Les méthodes utilisées sont souvent des méthodes combinant extraction et sélection comme les techniques de réduction (PCA, LDA,..) et les méthodes de sélection embarquées (LSTM et CNN). Les méthodes dédiées à la sélection (par filtrage et par grappage) n'ont pas été suffisamment explorées, elles ont pourtant l'avantage de garder le sens physique des caractéristiques à sélectionner, ce qui permet de comprendre les éléments qui ont le plus d'influence sur la sélectivité, et par conséquent d'améliorer la conception et les performances des capteurs MOX. L'étape de classification a été largement considérée par la communauté scientifique. La plupart des outils existants ont été testés pour apporter des solutions au problème de sélectivité des capteurs MOX.

Ainsi, la plupart des travaux de recherche considèrent le problème de la sélectivité des capteurs MOX uniquement comme un problème de classification, alors qu'il est plus pertinent et plus proche de la réalité du fonctionnement des capteurs MOX de considérer l'amélioration de leur sélectivité comme un problème combiné de classification et d'optimisation en ligne. En effet, le point de fonctionnement, et donc la sensibilité des capteurs MOX dépendent de la température de fonctionnement.

Nous proposons donc dans ce sujet de thèse le développement d'algorithmes optimisant la modulation de la température de fonctionnement du capteur en ayant par exemple comme critère d'optimisation la précision de l'algorithme de classification des gaz comme illustré sur la figure ci-dessous. L'apprentissage par renforcement (Reinforcement learning) sera particulièrement exploré dans cette thèse. En effet, cet outil de l'intelligence artificielle, inspiré de la théorie de la commande optimale, est bien adapté aux problèmes d'optimisation des solutions en apprenant à l'algorithme à converger vers la solution optimale parmi un ensemble de solutions possibles.



L'IM2NP, grâce à ses installations expérimentales qui sont le fruit de plusieurs années d'investissement, dispose aujourd'hui des moyens nécessaires au développement de ce type d'approche d'apprentissage-optimisation en ligne. l'équipe MicroCapteurs et Instrumentation de l'IM2NP dispose de nombreux bancs de test automatisés permettant de créer différentes mixtures de gaz dans un environnement contrôlé en température et humidité, couplé à un système d'acquisition et traitement de données en ligne afin de construire des bases de données pertinentes [5, 6, 7]. De plus, un capteur de type MOX a déjà été développé et breveté par l'IM2NP. Nous allons donc dans cette thèse développer un capteur intelligent, générique, et sélectif dont la propriété intellectuelle sera exclusivement IM2NP. L'aboutissement de ce projet de recherche fera de l'IM2NP et de l'équipe MCI un acteur majeur dans le développement de micro-capteurs intelligents, et donnera lieu à de nouveaux brevets, publications, et à de nouvelles coopérations industrielles et académiques.

### Résumé en anglais :

The lack of selectivity of MOX sensors is a recurring and topical problem that has mobilized the scientific community for several years, as it affects several fields of application such as transport, energy and health. The development of a software layer based on Artificial Intelligence (AI) is one of the most promising lines of research, aimed especially at proposing targeted solutions for well-defined application cases where the number and types of target gases are known in advance.

Literature studies show that the issue of MOX-sensors selectivity is often defined by the scientific community as a problem of supervised learning, and from a methodological point of view, machine learning and deep learning are the most used,

ranging from simple techniques such as KNN and advanced techniques such as DCNN, to combinations of tools such as LSTM-SVM [1]. The proposed solutions have made it possible to widely exploit existing tools for extraction, selection, classification of data, and decision-making [2, 3, 4].

Thus, most of the research works consider the problem of the selectivity of MOX-sensors only as a classification issue, whereas it is more relevant and closer to the reality of the operation of MOX-sensors to consider the improvement of their selectivity as a combined classification and online optimization problem. Indeed, the operating point, and therefore the sensitivity of MOX-sensors depends on the level of heating and the level of luminosity applied to the material.

So, this PhD proposal aims the development of algorithms optimizing the modulation of the heating temperature and the luminosity by considering as optimization criterion the accuracy of the gas classification algorithm. Reinforcement learning will be particularly explored in this thesis. Indeed, this artificial intelligence tool, inspired by the theory of optimal control, is well suited to problems of optimizing solutions by learning the algorithm to converge towards the optimal solution among a set of possible solutions.

IM2NP Lab, thanks to its experimental installations, resulting from several years of investment, now has the necessary means to develop this kind of online learning-optimization approach. The IM2NP-Lab, MCI team, has an experimental test bench for creating different gas mixtures in a controlled environment, coupled with an online data-acquisition and processing system [5, 6, 7]. In addition, a MOX-sensor has already been developed and patented by IM2NP. We will therefore in this PhD thesis develop an intelligent, generic, and selective MOX-sensor whose intellectual property will be exclusively IM2NP. The outcome of this research project will make IM2NP and the MCI team a major player in the development of smart micro-sensors, and will give rise to new patents and new industrial and academic cooperation.

### **Profil du candidat recherché :**

Master ou école d'ingénieur dans au moins deux des domaines suivants :

- Instrumentation,
- Microélectronique
- Électronique
- Automatique

Des compétences en traitement des données et intelligence artificielle seraient un atout considérable dans ce sujet, ainsi qu'une bonne aptitude au travail collaboratif et en autonomie, un bon relationnel, et un esprit d'initiative.

Mention Bien au master indispensable.

### Publications sur le sujet :

1. M. A. Djeziri, S. Benmoussa, M. Bendahan, J. L. Seguin. " Review on data-driven approaches for improving the selectivity of MOX-sensors. *Microsystem Technologies* (2023). Under Review.
2. M. A. Djeziri, O. Djedidi, N. Morati,, JL Seguin, M Bendahan, T Contaret. A temporal-based SVM approach for the detection and identification of pollutant gases in a gas mixture. *Applied Intelligence* (2021).  
<https://doi.org/10.1007/s10489-021-02761-0>.
3. O. Djedidi, M. A. Djeziri, N. Morati, J. L. Seguin, M. Bendahan." Accurate Detection and Discrimination of Pollutant Gases Using a Temperature Modulated MOX Sensor Combined with Feature Extraction and Support Vector Classification ". *Sensors & Actuators* 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129817>.
4. M. A. Djeziri, M. Bendahan. "Special Issue : Advances in Machine Learning and Deep Learning Based Machine Fault Diagnosis and Prognosis". Editorial. V.9, Issue 532 *Processes* (2021), <https://doi.org/10.3390/pr9030532>
5. M. Bendahan, P. Lauque, J. L. Seguin, K. Aguir, P. Knauth; Development of an ammonia gas sensor; *Sensors & Actuators B* 95 (2003) p 170-176.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00408-8](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00408-8).
6. M. Bendahan, R. Boulmani, J.L. Seguin, K. Aguir; Characterization of ozone sensors based on WO<sub>3</sub> reactively sputtered films: influence of O<sub>2</sub> concentration in the sputtering gas, and working temperature.; *Sensors & Actuators B* 100 (2004) p. 320-324; <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.01.023>.
7. P. Lauque, M. Bendahan, J.L. Seguin, K.A. Ngo, P. Knauth; Highly sensitive and selective room temperature NH<sub>3</sub> gas microsensor using an ionic conductor (CuBr) film.; *Analytica Chimica Acta* Volume 515, Issue 2, 12 July 2004, Pages 279-284; <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.03.071>.

**Insertion professionnelle après thèse** : publique et/ou privée