

## Innovation sensorielle et technologique : l'intégration des systèmes électroniques dans l'industrie agroalimentaire

**Résumé** Les nez et les langues électroniques accompagnés des systèmes de vision artificielle et regroupés sous le terme de machines sensorielles, occupent une place cruciale dans l'industrie agroalimentaire en détectant, analysant et contrôlant divers aspects des produits alimentaires. Les nez électroniques équipés de capteurs gaz, identifient les odeurs, garantissant ainsi la qualité des produits et leur conformité aux normes de sécurité alimentaire. Les langues électroniques, fondées sur des capteurs ioniques spécialement conçues pour des environnements liquides, évaluent les propriétés gustatives des aliments, recueillant ainsi les informations relatives aux saveurs et détectant d'éventuelles altérations dans les produits. Les systèmes de vision artificielle inspectent visuellement les produits alimentaires, détectant les défauts, les contaminants et les irrégularités de forme pour améliorer la qualité de la production. Pour extraire des informations pertinentes des signaux enregistrés, ces machines sensorielles recourent à des techniques de chimiométrie avancées permettant d'optimiser les processus de production, de maintenir la qualité des produits et de répondre aux attentes des consommateurs. Cette approche renforce ainsi la sécurité alimentaire et l'efficacité opérationnelle de l'industrie agroalimentaire.

**Mots-clés** Analyse sensorielle, systèmes électroniques, e-Nose, e-Tongue, e-Eye, qualité.

**Abstract** **Sensory and technological innovation: integration of electronic systems in the agri-food industry**  
In the agricultural and food industries, an array of sophisticated sensory machines – including electronic noses, tongues, and artificial vision systems – plays a critical role in monitoring and analyzing various aspects of food products. Electronic noses, equipped with gas sensors, detect odors to ensure product quality and compliance with food safety standards. Electronic tongues, designed with ion sensors for aqueous environments, evaluate the taste properties of foods, collecting data on flavor and detecting any deviations. Additionally, artificial vision systems inspect food items visually, spotting defects, contaminants, and irregular shapes to elevate production quality. Utilizing advanced chemometric techniques, these sensory machines analyze the data from these observations to refine production processes, maintain high product standards, and satisfy consumer expectations. This integrated approach significantly enhances both safety and efficiency in the agri-food industry.

**Keywords** Sensory analysis, electronic systems, e-Nose, e-Tongue, e-Eye, quality.

### Introduction

Au cours des trois dernières décennies, les crises sanitaires ont considérablement élevé les attentes des consommateurs en matière d'aliments sains et durables, issus d'une agriculture et d'une chaîne de production et de distribution éco-responsable. Cette prise de conscience environnementale a mis en lumière l'importance cruciale de garantir la qualité des aliments pour répondre à ces nouvelles exigences. Dans ce contexte, les caractéristiques sensorielles telles que l'odeur, le goût et l'apparence revêtent une importance particulière. Il s'agit de caractéristiques internes telles que la composition chimique, les propriétés physiques et microbiologiques, de facteurs externes (forme, taille, couleurs, défauts de surface), le tout associé à la flaveur (saveurs et odeurs). Pour analyser ces caractéristiques, des dispositifs électroniques tels que les nez électroniques et les langues électroniques ont été conçus afin de capter précisément le profil sensoriel des produits alimentaires [1]. Ce processus conduit généralement à l'acquisition d'une empreinte analytique distinctive. En parallèle, bien que l'analyse sensorielle humaine conserve une place prépondérante, elle est confrontée à ses propres contraintes, notamment les limitations sémantiques et linguistiques ainsi que des facteurs tels que la fatigue, la subjectivité et la variabilité interindividuelle. En tant qu'expression de notre expérience et de notre mémoire sensorielle, elle demeure essentielle à l'évaluation de la qualité des aliments [2]. Néanmoins, les

technologies modernes sont capables de surmonter les contraintes inhérentes aux évaluations humaines. Les progrès dans le domaine des capteurs et l'intelligence artificielle, ont facilité la création de dispositifs électroniques sophistiqués, capables de mesurer et d'analyser divers paramètres physico-chimiques pour assurer la qualité des aliments. Ces appareils désignés sous le terme de « e-devices » ou machines sensorielles, capturent et traitent les données en utilisant des techniques avancées telles que la reconnaissance de motifs et l'apprentissage automatique pour affiner les processus décisionnels. Les méthodes chimiométriques, qu'elles soient supervisées ou non supervisées, se déploient selon trois grandes orientations – exploratoires, de classification et de régression – et sont intégrées à ces technologies. La sélection de la méthode adéquate doit être effectuée en fonction de l'objectif spécifique et du type de données à analyser. Les algorithmes exploratoires de réduction de la dimensionnalité des données sont essentiels pour analyser les données collectées, car ils facilitent la visualisation et la différenciation des échantillons [3]. Des méthodes telles que l'analyse en composantes principales (PCA) et l'analyse en composantes indépendantes (ICA) sont fréquemment utilisées à cet effet. Pour la classification des échantillons, une gamme d'approches, tant linéaires comme l'analyse linéaire discriminante (LDA), l'analyse factorielle discriminante (FDA), que non linéaires comme les réseaux de neurones (ANN), a été largement mise en œuvre, reflétant la diversité des méthodologies

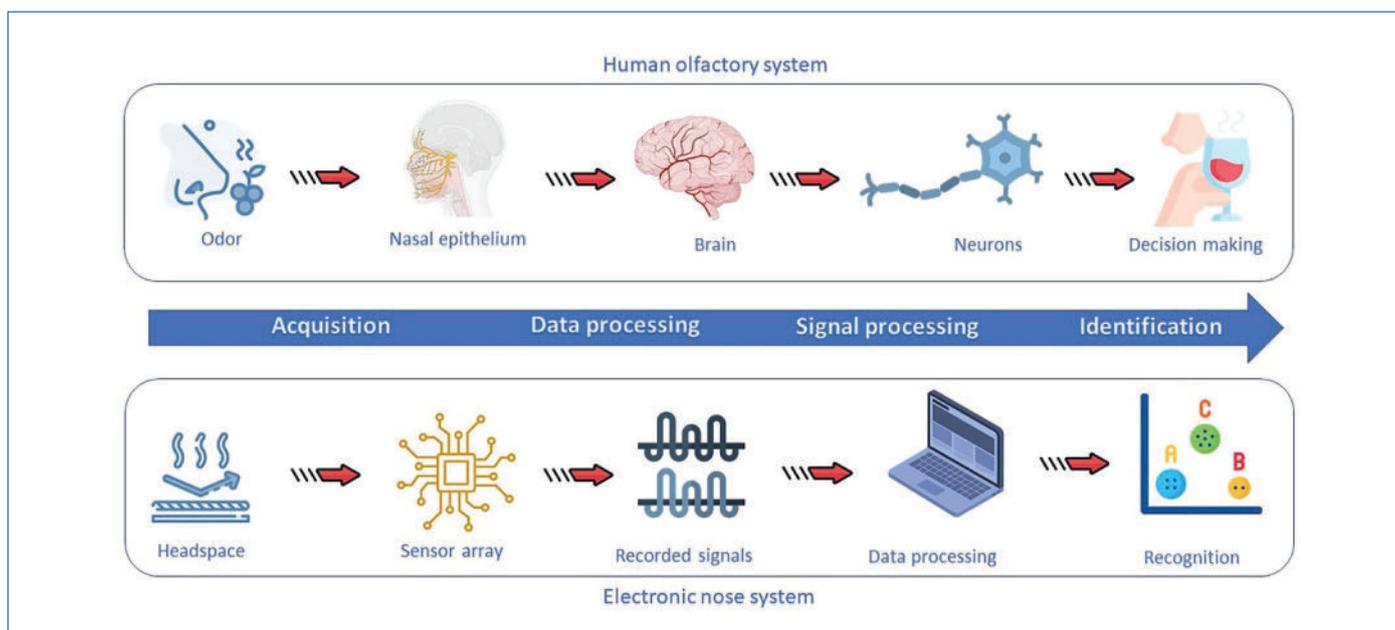


Figure 1 - Corrélation entre l'olfaction humaine et l'olfaction artificielle, extrait de [1].

disponibles. Pour l'objectif de modélisation prédictive, utilisant un ensemble de variables indépendantes en corrélation avec un second jeu de données (variables dépendantes) représentant les caractéristiques des échantillons, les méthodes de régression linéaire comme les moindres carrés partiels (PLS) et la régression ridge, ou plus généralement les techniques de régression linéaires multiples, sont préconisées [4].

Cet article examine les principaux systèmes de nez et langues électroniques dédiés à l'évaluation de la qualité des aliments. L'analyse se concentre sur les principes de fonctionnement de ces dispositifs, les matrices alimentaires étudiées, les méthodes chimiométriques utilisées, ainsi que sur les avantages et les limites associés à leur emploi.

## Les nez électroniques

### Principes de fonctionnement

L'outil d'analyse olfactive idéal doit suivre les variations temporelles et mesurer objectivement les perceptions sensorielles humaines. Les nez électroniques, apparus dans les années 1980, ont répondu à ce besoin en utilisant des capteurs et des systèmes de reconnaissance pour identifier et différencier diverses odeurs, trouvant une application répandue dans l'industrie agroalimentaire [5]. La figure 1 montre l'analogie entre les systèmes olfactifs artificiels et l'olfaction humaine. L'évolution vers les nez électroniques dernière génération basés sur la chromatographie en phase gazeuse ultra-rapide, appelés « Fast-GC », dans les années 2000, a permis des analyses encore plus rapides et automatisées des arômes alimentaires, conciliant la rapidité avec une identification moléculaire plus précise que n'étaient en mesure de le faire les capteurs gaz. La technologie Fast-GC a ainsi réduit le temps d'analyse par rapport aux analyseurs chromatographiques classiques de 30-50 minutes à 6-8 minutes, favorisant des séquences d'analyses à haut débit [6], se positionnant ainsi comme une alternative sérieuse aux nez-électroniques. Cette approche Fast-GC n'a cependant pas éliminé l'usage des technologies capteurs dans l'offre commerciale des nez et langues électroniques. Dans les pages suivantes, nous dresserons un bref inventaire des capteurs les plus fréquemment

utilisés. Pour une exploration détaillée des mécanismes physico-chimiques à l'œuvre dans ces capteurs, le lecteur est invité à consulter les travaux de Debliqy *et al.* [7].

### Types de capteurs

Selon la définition admise d'Otto Wolfbeis [8], un capteur doit être un dispositif compact comprenant un élément de reconnaissance, un transducteur et un élément de traitement du signal. Il doit permettre une mesure continue et réversible de l'évolution d'une concentration chimique, soulignant l'importance de la réversibilité pour un fonctionnement permanent et dynamique. Un capteur chimique doit convertir une grandeur chimique en grandeur électrique, réagir rapidement, maintenir son activité sur une longue période, être de petite taille, avoir un faible coût de production et être spécifique d'un analyte ou d'au moins une famille d'analytes. Les capteurs chimiques se distinguent par le type de couche sensible et le principe de transduction. La figure 2 résume toutes les catégories de capteurs chimiques pouvant être utilisés pour la conception d'instruments de mesure. En particulier, deux classes de capteurs sont largement utilisées : les capteurs électrochimiques et les capteurs gravimétriques. L'attention sera portée ici essentiellement sur les capteurs les plus couramment utilisés pour des applications industrielles.

#### Les capteurs à oxydes métalliques (MOS)

Les nez électroniques utilisant des capteurs à semi-conducteurs sont généralement constitués d'un assemblage de capteurs à base d'oxydes métalliques (MOS). Le fonctionnement de ces derniers consiste à mesurer les changements de résistance électrique de leur couche d'oxyde métallique chauffée lorsqu'elle entre en contact avec des gaz. La résistance varie spécifiquement selon le type et la concentration du gaz, permettant ainsi une analyse qualitative et quantitative. Ces capteurs sont largement utilisés pour leur sensibilité et leur simplicité [10a]. Avec l'occurrence de l'adultération de la viande d'agneau par la viande de porc, l'utilisation d'un nez électronique à base de capteurs MOS, conjointement avec les Réseaux de Neurones à Propagation en Retour (BPNN) a permis de développer un modèle quantitatif capable de

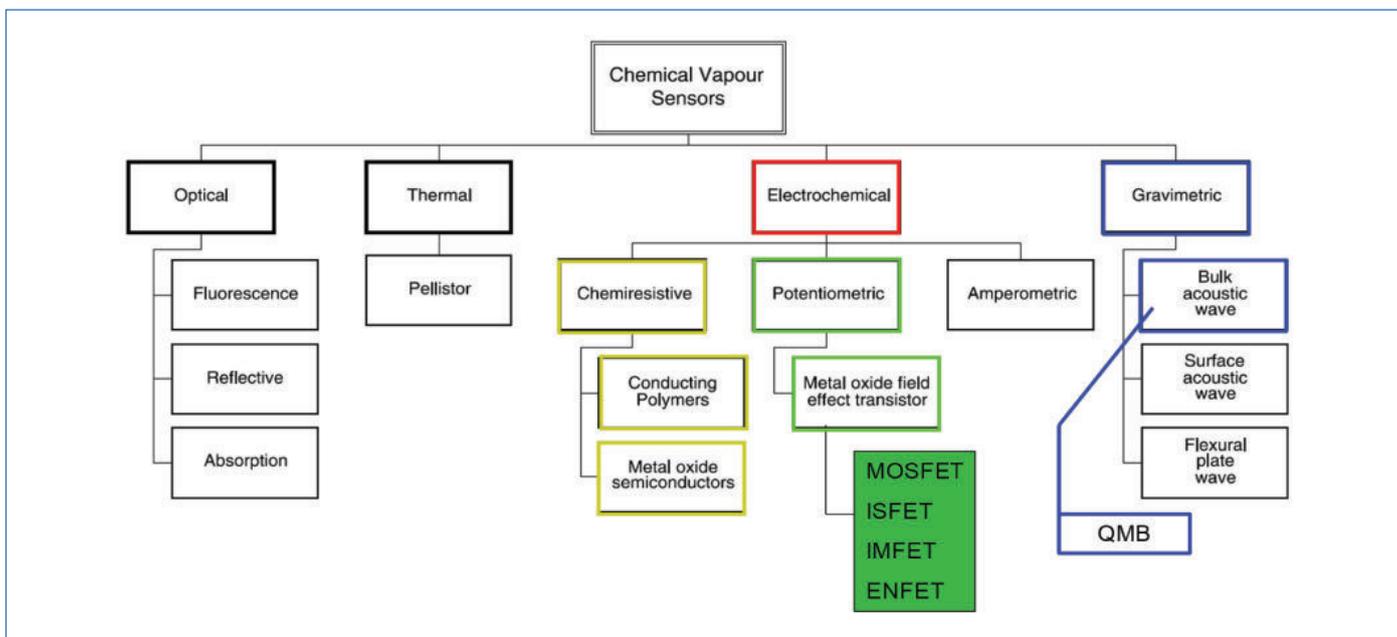


Figure 2 - Classification des capteurs chimiques (extrait de la réf. [9]), MOSFET (Metal Oxide Sensor-Field Effect Transistor), ISFET (Ion Sensitive-Field Effect Transistor), IMFET (Immuno-Field Effect Transistor), ENFET (Enzyme-Field Effect Transistor), QMB (Quartz Microbalances).

prédire le niveau d'adultération en teneur de viande de porc avec une corrélation élevée (supérieure à 0,97) pour les ensembles de calibration et de validation [11].

#### Les polymères conducteurs

Les capteurs à base de polymères conducteurs utilisent des matériaux polymères qui conduisent l'électricité pour détecter divers composés chimiques dans l'environnement. Ces polymères modifient leurs propriétés électriques, notamment leur résistance, en présence de certaines substances chimiques. Ces polymères sont appliqués sur des électrodes. Lorsqu'un gaz cible ou un analyte entre en contact avec le polymère, cela provoque une modification de la structure du polymère, changeant ainsi sa conductivité. Ces capteurs sont appréciés pour leur flexibilité, leur sensibilité à faible coût et la possibilité de les fabriquer sur mesure pour détecter des cibles spécifiques [10b]. À titre d'exemple, un nez électronique à base de 32 polymères conducteurs a été employé pour surveiller la dégradation fongique du colza. Une variation notable de la conductivité de ces capteurs a été constatée en raison de la présence de cétones, d'acides gras, d'esters et d'alcools, substances couramment retrouvées dans le colza altéré. La PCA appliquée sur les signaux enregistrés a permis d'identifier six groupes de niveaux de détérioration différents montrant que le nez électronique est un outil prometteur pour la détection rapide et non destructive du niveau de détérioration des graines oléagineuses [12].

#### Les microbalances à quartz

Les capteurs à base de microbalance à quartz (QMB) utilisent un cristal de quartz pour mesurer des variations de masse infimes à sa surface, causées par l'adsorption de molécules gazeuses. Ce type de capteur fonctionne sur le principe de la résonance piézoélectrique : un courant électrique est appliqué au cristal de quartz, le faisant vibrer à sa fréquence de résonance naturelle. Lorsque des particules ou des molécules se fixent à la surface du quartz, elles ajoutent une masse supplémentaire qui modifie cette fréquence de résonance. La variation de fréquence, très précise, est proportionnelle à la

masse des molécules adsorbées, permettant ainsi de détecter et de quantifier divers composants gazeux. Les QMB sont utilisés dans diverses applications, notamment la surveillance environnementale et l'analyse de la qualité de l'air, mais également dans la détection de microorganismes ou de molécules issues du vivants (protéines, anticorps, etc...). Alanazi *et al.* [10c] soulignent les avancées dans les technologies de capteurs QCM, telles que les améliorations des revêtements de capteurs et les capacités d'analyse en temps réel, en mettant en évidence la précision et la polyvalence du QCM pour diverses applications scientifiques et pratiques.

#### La Fast-GC

Les nez électroniques Fast-GC (FGC) intègrent les fonctionnalités de la chromatographie en phase gazeuse employant deux colonnes de longueur réduite (entre 2 et 10 m contre 30 à 60 m sur un système classique) à polarités différentes. Ils sont équipés de détecteurs FID qui permettent de générer rapidement les empreintes olfactives utilisées dans un processus de différenciation des échantillons de tout type et de toute nature [13]. Les systèmes FGC se distinguent par plusieurs avantages significatifs. Premièrement, ils permettent des analyses beaucoup plus rapides que les systèmes GC classiques, ce qui est crucial pour les applications nécessitant des réponses immédiates, comme dans les contrôles de processus industriels ou la surveillance environnementale. La réduction du temps d'analyse entraîne également des économies en gaz porteur et en énergie, rendant le processus plus écologique et moins coûteux. De plus, la nature compacte et la facilité d'utilisation des systèmes FGC les rendent accessibles même pour les opérateurs non spécialisés, facilitant leur déploiement dans divers environnements, y compris sur le terrain. Ces systèmes maintiennent également une haute sensibilité, capable de détecter de faibles concentrations de composés dans des échantillons complexes. Cela est particulièrement bénéfique dans les industries alimentaire et cosmétique, où la détection rapide et précise des composés volatils est essentielle pour assurer la qualité et la sécurité des produits.

Cependant, un inconvénient notable des systèmes FGC est leur tendance à offrir une résolution inférieure par rapport aux systèmes GC traditionnels. Cette limitation peut rendre difficile la séparation et l'identification de composés très proches chimiquement. Il importe donc de les utiliser pour leur force, c'est-à-dire en configuration « nez-électronique » avant tout où ils montrent des performances élevées. Par exemple, la discrimination des liqueurs de cacao, basée sur leur empreinte olfactive, a été réalisée grâce à la FGC. Quatorze liqueurs de cacao provenant de dix origines géographiques différentes ont été étudiées. L'ACP a été utilisée pour analyser les empreintes olfactives et a réussi à discriminer la plupart des échantillons à l'étude [14].

### Grandes classes d'applications

Les nez électroniques sont utilisés pour analyser un grand nombre de matrices alimentaires en détectant les composés organiques volatils présents dans l'espace de tête des échantillons. Leurs applications comprennent l'évaluation de la qualité, de l'authenticité et de la fraîcheur des produits carnés tels que le bœuf, le porc, le poulet et le poisson [15], ainsi que la détermination du niveau de maturité et la présence de pesticides dans les fruits et légumes tels que les raisins, les tomates, les bananes et les pommes [16]. De plus, ces systèmes sont utilisés pour analyser les produits laitiers, en identifiant le niveau de maturité des fromages et en déterminant l'authenticité et la qualité du lait et du beurre [17]. Les breuvages (vin, bière, jus) ont également été analysés pour déterminer leur fraîcheur, variété aromatique et origine géographique [18].

### Traitement de données

Le prétraitement des données est également une phase cruciale dans l'analyse des données générées par les nez électroniques. Les nez et langues électroniques étant le plus souvent utilisés pour répondre à des objectifs de contrôle-qualité, de comparaison de produits ou encore de caractérisation de variété de produits, les algorithmes mis en œuvre sur les données collectées restent le plus souvent dans le domaine de l'analyse factorielle tels que la PCA, l'AFD, les algorithmes de classification automatique comme SIMCA (*Soft Independent Modeling of Class analogy*) ou les outils statistiques de suivi de procédé (*Statistical Quality-Control - SQC*). La correction de ligne de base, la compression et la normalisation ont été utilisées pour prétraiter les signaux des capteurs MOS. Pour les données chromatographiques générées par les nez électroniques basés sur la FGC, la PCA est régulièrement appliquée pour réduire la dimensionnalité des données lors du prétraitement [19]. À titre d'exemple, la PCA et la FDA ont été employées pour traiter les données générées FGC dans le but de différencier divers types d'aliments ou de boissons alcoolisées [19a-19d].

### Avantages et limites

Les nez-électroniques à capteurs gaz, intégrant divers types de capteurs tels que les capteurs à oxydes métalliques ou à polymères conducteurs, offrent une réponse rapide et sont relativement peu coûteux à produire. Leur capacité à fonctionner à température ambiante sans préparation spécifique des échantillons en fait des outils pratiques pour le contrôle de qualité en temps réel dans les industries alimentaire, de l'environnement et de la santé [20]. Toutefois, leur manque de spécificité peut conduire à des interférences croisées,

réduisant leur fiabilité pour des analyses complexes. À l'opposé, les nez-électroniques basés sur la Fast-GC se distinguent par une meilleure sélectivité et sensibilité. Ils permettent une séparation efficace des composants d'un échantillon avant détection, ce qui réduit significativement les interférences. Cela les rend particulièrement adaptés pour l'analyse de mélanges complexes dans les industries chimiques et pharmaceutiques. La sensibilité est également supérieure avec la Fast-GC, qui peut détecter des concentrations infimes de composés grâce à sa technologie de séparation fine et de détection spécifique. En ce qui concerne la stabilité de la ligne de base, la Fast-GC montre une performance remarquable due à une meilleure gestion des fluctuations environnementales et à une technique plus contrôlée, réduisant les risques d'interférences et améliorant la reproductibilité des mesures. Néanmoins, ces systèmes sont plus coûteux, tant en termes d'équipement initial que de maintenance, et nécessitent des opérateurs qualifiés pour leur manipulation.

En conclusion, le choix entre ces deux types de nez-électroniques dépend largement des besoins spécifiques de l'application industrielle visée et des ressources disponibles. Les capteurs gaz sont préférables pour des applications nécessitant une grande simplicité et rapidité, tandis que la Fast-GC est mieux adaptée pour des analyses détaillées et précises dans des contextes plus complexes.

## Les langues électroniques

### Principe de fonctionnement

Les langues électroniques, une variante des nez électroniques pour l'analyse des liquides, évaluent certaines composantes du goût des produits. À l'instar des nez-électroniques, les langues électroniques ont été conçues avec l'idée de collecter des données dans un processus calqué sur ce que pourrait faire le système gustatif humain (*figure 3*). Elles offrent une sélectivité globale, regroupant les informations des capteurs pour évaluer la qualité gustative.

Grâce à leur rapidité, leur sélectivité et leur sensibilité, elles sont considérées comme des unités sensorielles analytiques, détectant des substances spécifiques par des réactions électrochimiques. Elles permettent ainsi l'analyse de matrices liquides, produisant des empreintes caractéristiques de mélanges dont on souhaite mesurer les saveurs [21]. Ces systèmes peuvent utiliser divers types de capteurs, notamment électrochimiques, gravimétriques et optiques. Les langues basées sur un principe potentiométrique ou voltamétrique rencontrent le plus de succès [22].

### Types de capteurs

#### Les capteurs potentiométriques

Les capteurs potentiométriques mesurent la différence de potentiel électrique entre une électrode de référence et une électrode sensible aux ions spécifiques dans une solution. Cette mesure permet d'identifier et de quantifier les composants chimiques présents, utile pour analyser des arômes ou détecter des polluants dans l'environnement. Ils sont la clé pour des applications où la composition chimique précise doit être rapidement évaluée. La différence de potentiel mesurée est proportionnelle au logarithme de la concentration de l'espèce ionique, selon l'équation de Nernst. Leurs avantages résident dans leur prix abordable, leur fabrication simple et leur sélectivité. Ils sont en revanche sensibles à la température

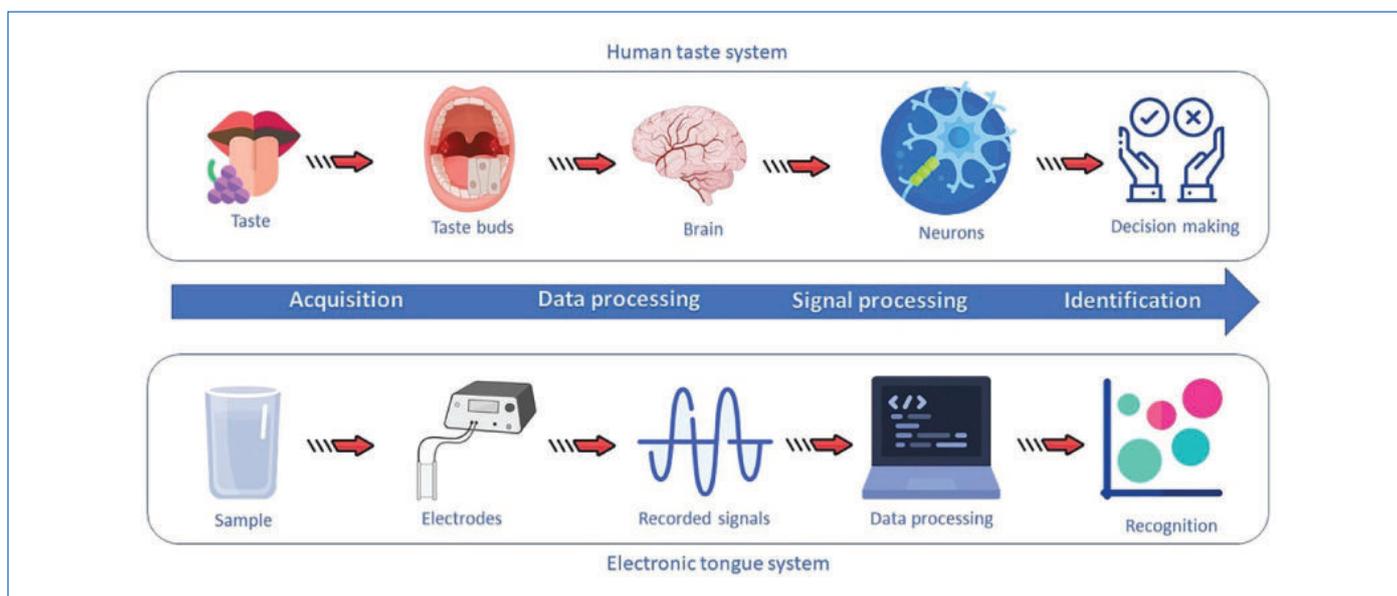


Figure 3 - Organigramme décrivant le fonctionnement d'une langue électronique, extrait de [1].

et sujets à l'adhérence de la solution à l'électrode, pouvant entraîner des changements de potentiel [23]. L'étude de Bobiano *et al.* [24] sur les huiles d'olive illustre est un exemple de mise en œuvre d'une langue électronique à capteurs potentiométriques, en combinaison avec l'analyse linéaire discriminante pour détecter les défauts sensoriels des huiles d'olives extra vierge (EVOO) et lampantes (LOO) modifiées par ajout d'herbes aromatiques naturelles pour les rendre sensoriellement acceptables. Pour limiter l'occurrence de cette pratique frauduleuse, une approche utilisant une langue électronique est efficace et montre des performances de « démasquage » donc de détection satisfaisante par rapport au groupe de dégustation humain. La LDA appliquée sur les signaux enregistrés sur les capteurs potentiométriques montre une discrimination satisfaisante entre les huiles lampantes des huiles extra vierge.

#### Les capteurs voltamétriques

Les capteurs voltamétriques dans les langues électroniques fonctionnent en appliquant un potentiel électrique aux électrodes immergées dans une solution contenant des analytes. Le potentiel est ajusté pour provoquer des réactions d'oxydation ou de réduction sur les électrodes, générant un courant électrique mesurable. Ce courant est directement proportionnel à la concentration de l'espèce chimique cible dans la solution. En variant le potentiel appliqué et en analysant le courant résultant, ces capteurs peuvent identifier et quantifier une large gamme de substances, ce qui les rend particulièrement utiles pour détecter des composants spécifiques dans des applications environnementales, de santé ou de sécurité alimentaire. Ils offrent une méthode rapide et sensible pour analyser la composition chimique des échantillons. Malgré leur capacité à atteindre de faibles limites de détection, ces capteurs peuvent subir une dérive et une perte de sensibilité lors de l'analyse de matrices complexes comme le lait, ce qui peut endommager les capteurs à long terme [25]. Dans le domaine viticole, les travaux de Cetó *et al.* [26] mettent en œuvre une langue électronique à capteurs voltampérométriques comme un outil de discrimination des vins capable de classer les échantillons selon les modalités de vieillissement en barriques et de prédire les notes sensorielles

globales attribuées par un panel sensoriel entraîné. Dans une première tentative, les données enregistrées sur des vins élevés en fûts de chêne français et américains ont été traitées par analyse en composantes principales montrant ainsi la grande facilité à différencier les deux types de vins à partir des données capteurs. En outre, des modèles PLS-R avec une performance satisfaisante ont été construits pour prédire l'âge du vin (RMSE = 0.77) et corréler les réponses-capteurs aux notes sensorielles de vins (RMSE = 0.11) pour des scores allant de 0 à 10. Ces résultats confirment le potentiel de cette approche à modéliser l'information sensorielle humaine par le biais de systèmes de langues électroniques.

#### Quelques grandes classes d'applications

Les langues électroniques ont été largement employées dans l'analyse alimentaire pour évaluer une gamme diversifiée de matrices. Elles ont permis d'étudier les boissons et condiments tels que le vin, le vinaigre, le thé, le café en se concentrant sur des aspects tels que le goût, l'âge, l'origine géographique et la composition chimique [27]. De plus, les huiles ont été examinées pour évaluer leur qualité physico-chimique, leur authenticité et leur composition [24], tandis que les produits laitiers ont été sujets à des études visant à fournir une analyse plus objective et rapide de leurs propriétés sensorielles [28]. Enfin, les fruits et légumes ont également été soumis à des analyses pour évaluer leur qualité, leur fraîcheur et déterminer leur origine géographique [29].

#### Traitement de données

Le prétraitement des données est crucial pour garantir la fiabilité des informations recueillies par les langues électroniques. La normalisation des signaux des capteurs réduit le bruit et standardise les données. En outre, la PCA a été employée pour sélectionner les variables les plus pertinentes, minimisant ainsi la redondance et améliorant la qualité des données en complément à des méthodes supervisées de régression : PLS-R, PCR (Régression par composantes principales), MLR (Régression linéaire multiple) et de discrimination : LDA, PLS-DA (Partial Least Squares Discriminant Analysis), DA (Analyse discriminante). À titre d'exemple, Cetó *et al.* [26] ont utilisé un système de langue électronique avec des capteurs

voltamétriques pour distinguer les vins selon leur élevage en barriques et prédire leurs notes globales données par un panel sensoriel. En utilisant la PCA, les données sur les vins élevés en fûts français et américains ont montré une capacité à différencier les deux types de vins. De plus, des modèles de PLS-R ont été élaborés pour corrélérer les réponses de la langue électronique avec les notes sensorielles attribuées par le panel, montrant le potentiel de cette approche pour modéliser l'information sensorielle humaine à travers des systèmes analytiques [26].

### Avantages et limites

Les langues électroniques, dispositifs imitant la perception gustative humaine, permettent une analyse rapide et précise des saveurs. Leurs avantages incluent une grande sensibilité aux composés chimiques variés, la capacité à évaluer des échantillons complexes, et la fourniture de mesures répétables et objectives, sans la subjectivité humaine. Elles sont utiles dans des domaines comme le contrôle qualité alimentaire, la surveillance environnementale, et la médecine. Cependant, elles ont des limitations importantes. Leur interprétation dépend fortement de systèmes de calibration et de modélisation avancés, ce qui peut s'avérer complexe et coûteux. De plus, ces dispositifs peuvent être sensibles aux variations de conditions environnementales telles que la température et l'humidité, ce qui peut affecter leur fiabilité. Le coût initial élevé de l'équipement et la nécessité d'un entretien régulier pour assurer une performance optimale sont également des considérations importantes. Ces systèmes requièrent une expertise technique pour la configuration et la maintenance, limitant ainsi leur usage à des utilisateurs qualifiés ou nécessitant des formations spécifiques [30].

### Systèmes sensoriels électroniques vs Panels sensoriels humains

Les systèmes sensoriels électroniques, tels que les langues et les nez électroniques, sont des alternatives aux panels humains pour l'évaluation du goût et de l'odeur des produits agroalimentaires. Bien qu'ils offrent une analyse rapide et objective (tableau I), ces dispositifs ne peuvent pas prendre en compte des facteurs humains tels que les émotions ou la mémoire et n'évaluent pas de la même manière la texture ou la température des aliments. Les sensations humaines

chimioesthésiques ou chimiothermiques<sup>(1)</sup> ne sont pas perçues et donc absentes dans des données provenant d'une langue électronique. L'image sensorielle globale est donc incomplète pour rendre compte des aspects hédoniques (agréable, désagréable, étonnant, surprenant, écœurant, douloureux, etc...). Par conséquent, les panels sensoriels demeurent indispensables pour évaluer les caractéristiques les plus complexes des aliments, des études comparatives entre les panels humains et les systèmes électroniques sont menées dans le but d'établir des corrélations entre ces deux univers sensoriels. Le défi réside dans la corrélation des descripteurs humains avec les réponses des machines sensorielles. Cela implique un choix judicieux d'un référentiel sensoriel avec des descripteurs communs à tous les échantillons. D'autre part, il est crucial de sélectionner des échantillons pour lesquels l'évaluation quantitative peut être réalisée sur une échelle numérique, visant une représentativité étendue dans le domaine de mesure. Tudou *et al.* [31] ont utilisé des réseaux de neurones pour modéliser les données sensorielles humaines recueillies sur des échantillons de thé noir à partir des réponses des capteurs d'un nez électronique. Cinq capteurs sensibles à divers composés typiques de l'arôme du thé noir (géraniol, linalol, 2-phényl-éthanol) ont été sélectionnés pour modéliser l'information sensorielle humaine. Une validation du modèle avec des échantillons inconnus a abouti à un taux de classification de plus de 90 %. Cette approche favorise la réduction des coûts associés aux tests sensoriels humains à grande échelle.

### Les technologies capteurs les plus récentes

L'électronique étant en perpétuelle évolution et la production de masse conduisant toujours à une baisse des prix à l'unité, les technologies capteurs de type MOS et autres QMB ou polymères conducteurs seront toujours des options intéressantes pour l'élaboration de dispositifs bon marché et relativement simples à mettre en œuvre. D'autres technologies sont en cours de maturation aujourd'hui et viennent déjà ou viendront à remplacer les plus anciennes pour en augmenter les performances. L'avenir des machines sensorielles, repose sur l'intégration de technologies nouvelles telles que la spectroscopie à mobilité ionique (IMS). L'IMS peut être utilisée pour la détection rapide des odeurs à des niveaux extrêmement faibles (traces). Cette technique sépare les ions en

Tableau I - Comparaison entre les performances des systèmes sensoriels électroniques et les panels sensoriels humains (inspiré de Sanaeifar *et al.* [5]).

Paramètre	Panel sensoriel humain	Langues et nez électroniques
Coût d'une analyse	Élevé	Faible
Durée d'une analyse	Quelques secondes	De quelques secondes à quelques minutes
Préparation de l'échantillon	Aucune	Pour un échantillon complexe analysé par langue électronique
Simplicité de la mesure	Très simple en apparence mais peut nécessiter un entraînement long	Très simple
Reproductibilité	Dépend des dégustateurs humains	Dépend de la structure du système et de la qualité de l'ensemble de données d'apprentissage
Analyse qualitative	Oui	Oui
Analyse quantitative	Oui sur des échelles simples	Oui
Automatisation	Non	Oui
Analyse en temps réel	Oui, mais pas de façon prolongée	Oui

fonction de leur mobilité dans un courant de gaz sous l'influence d'un champ électrique. Autre technologie prometteuse, les capteurs optoélectroniques. Ces dispositifs détectent les changements dans la lumière transmise ou réfléchie causés par l'absorption de composés volatils. Les capteurs optoélectroniques sont particulièrement utiles pour les applications où les composés cibles ont des propriétés d'absorption optique distinctes. Dans cette classe de capteurs, on peut citer les photodétecteurs. Ces derniers utilisent des photodiodes, des phototransistors ou des photomultiplicateurs pour mesurer l'intensité lumineuse. Ils sont souvent employés dans les dispositifs de mesure de lumière ambiante, les systèmes de sécurité, et pour la détection de la présence ou de l'absence d'objets par interruption de faisceau lumineux. Les capteurs de fluorescence : capables de détecter la lumière émise par certains composés après avoir été excités par une source lumineuse spécifique, ces capteurs sont extrêmement sensibles et sont utilisés pour la détection de traces de substances dans les domaines médical, environnemental et biologique. Les capteurs Raman : basés sur la spectroscopie Raman, ces capteurs analysent la lumière dispersée par les molécules pour identifier la composition chimique des substances. Ils sont utiles dans les analyses chimiques complexes, notamment pour identifier les matériaux, les substances chimiques et les biomolécules. Les capteurs de réflectance : ces capteurs mesurent la lumière réfléchie par les surfaces pour déterminer la couleur, la texture ou d'autres propriétés matérielles. Ils sont fréquemment utilisés dans les systèmes de contrôle qualité en production industrielle et l'analyse alimentaire. Les interféromètres optiques : utilisés pour mesurer avec une extrême précision de petites distances ou des changements d'épaisseur, ces capteurs exploitent l'interférence de la lumière pour fournir des données sur les propriétés physiques des matériaux ou des composants optiques. Les capteurs à fibre optique : incorporant des fibres optiques comme éléments de détection, ces capteurs peuvent détecter des changements de température, de pression, ou de composition chimique en mesurant les variations dans la transmission de lumière à travers la fibre. Ils sont particulièrement utiles dans des environnements difficiles ou dangereux, comme les installations pétrochimiques ou les centrales nucléaires. Enfin, les capteurs CCD (Charge-Coupled Device) et CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) : utilisés dans les caméras et les scanners, ces capteurs convertissent la lumière en charges électriques qui sont ensuite traitées en images numériques. Ils sont essentiels dans la photographie, la vidéographie, l'astronomie, et la vision industrielle. Ils sont notamment utilisés dans la construction de caméra hyperspectrales infrarouge ainsi que de caméra infrarouge thermiques adaptées à la détection à distance de composés chimiques volatils pour des applications de sécurisation de sites chimiques, ou d'investigations à distance dans le cadre d'opérations militaires.

Ces technologies récentes sont autant d'alternatives intéressantes pour le développement de nouvelles machines sensorielles encore plus versatiles et plus performantes que celles qui ont été produites et commercialisées durant les trente dernières années. On peut anticiper dès aujourd'hui que la combinaison de plusieurs d'entre elles avec des IA spécifiquement développées pour la reconnaissance et le traitement d'un grand nombre de propriétés sensorielles feront naître de futurs *e-devices* doués d'une sensibilité et de capacités d'apprentissage quasi humaines. Les capacités en mémoire

aidant, ces nouvelles machines sensorielles seront-elles alors un jour douées de conscience ? L'avenir ne marquera pas de surprises ?

## Conclusion

Depuis les années 1980, l'industrie agroalimentaire a vu une montée en popularité des systèmes sensoriels électroniques, tels que les nez et langues électroniques, ainsi que les technologies avancées de chromatographie en phase gazeuse ultra-rapide (Fast-GC). Ces innovations se distinguent par leur précision, rapidité, facilité d'usage, coût modéré, et la capacité de surveiller les processus en temps réel avec une préparation minimale des échantillons. Le traitement sophistiqué des données joue un rôle crucial, fusionnant les réponses de ces capteurs avec les perceptions sensorielles humaines pour une analyse plus intégrée et précise. L'émergence des sciences des données a rendu précieuse la combinaison des signaux issus de divers systèmes sensoriels électroniques, améliorant ainsi leur sélectivité et fiabilité. Néanmoins, les panels sensoriels humains, bien que coûteux et exigeant une formation extensive, demeurent essentiels pour évaluer les nuances complexes des aliments que les technologies ne parviennent pas encore à capturer pleinement. Les progrès futurs prévoient l'intégration de capteurs encore plus performants et l'application de l'intelligence artificielle, rendant ces outils électroniques encore plus attrayants pour la prédiction des caractéristiques des échantillons. Ces avancées promettent de transformer ces systèmes en composantes fondamentales des usines agroalimentaires intelligentes de demain, marquant une nouvelle ère de précision et d'efficacité dans le contrôle qualité.

(1) Les sensations chimoesthésiques et chiothermiques sont des sensations qui sont enregistrées par le nerf trigéminal qui traverse notre visage. Lors de la dégustation des aliments il procure les sensations de chaud et de froid physique ou chimique et de pétillant. Il nous fait également percevoir l'irritant et l'âcre et il procure également la capacité à détecter l'astringence.

[1] H. Abi Rizk, D. Bouveresse, J. Chamberland, C.B.Y. Cordella, Recent developments of e-sensing devices coupled to data processing techniques in food quality evaluation: a critical review, *Analytical Methods*, **2023**, doi: 10.1039/d3ay01132a.

[2] M.G. Ghasemi-Varnamkhashi, M. Aghbashlo, Electronic nose and electronic mucosa as innovative instruments for real-time monitoring of food dryers, *Trends in Food Science and Technology*, **2014**, 38(2), p. 158-166, Elsevier Ltd, doi: 10.1016/j.tifs.2014.05.004.

[3] E. Szymańska, Modern data science for analytical chemical data – A comprehensive review, *Analytica Chimica Acta*, **2018**, 1028, p. 1-10, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.aca.2018.05.038.

[4] J.L.Z. Zaukuu, G. Bazar, Z. Gillay, Z. Kovacs, Emerging trends of advanced sensor based instruments for meat, poultry and fish quality – a review, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **2019**, doi: 10.1080/10408398.2019.1691972.

[5] A. Sanaeifar, H. ZakiDizaji, A. Jafari, M. de la Guardia, Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: A review, *TRAC - Trends in Analytical Chemistry*, **2017**, 97, p. 257-271, doi: 10.1016/j.trac.2017.09.014.

[6] Y. Zhang, G. Wu, C. Chang, Y. Lv, W. Lai, H. Zhang, X. Wang, Q. Jin, Determination of Origin of Commercial Flavored Rapeseed Oil by the Pattern of Volatile Compounds Obtained via GC-MS and Flash GC Electronic Nose, *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, **2020**, 122(3), doi: 10.1002/ejlt.201900332.

[7] M. Debligny, Capteurs chimiques, Techniques de l'Ingénieur.

[8] O.S. Wolfbeis, Chemical sensors - Survey and Trends, *Fresenius J. Anal. Chem.*, **1990**, 337(5), p. 522-527, doi: 10.1007/BF00322857.

[9] D. James, S.M. Scott, Z. Ali, W.T. O'Hare, Chemical sensors for electronic nose systems, *Microchimica Acta*, **2005**, 149(1-2), p. 1-17, doi: 10.1007/s00604-004-0291-6.

[10] a) A.D. Wilson, M. Baietto, Applications and advances in electronic-nose technologies, *Sensors*, **2009**, 9(7), p. 5099-5148, doi: 10.3390/s90705099; b) A. Verma, R. Gupta, A.S. Verma, T. Kumar, A review of composite conducting polymer-based sensors for detection of industrial waste gases, *Sensors and Actuators Reports*, **2023**, 5, 100143, <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100143>.

- [11] X. Tian, J. Wang, R. Shen, Z. Ma, M. Li, Discrimination of pork/chicken adulteration in minced mutton by electronic taste system, *Int. J. Food Sci. Technol.*, **2019**, *54*(3), p. 670-678, doi: 10.1111/ijfs.13977.
- [12] M. Gancarz, J. Wawrzyniak, M. Gawrysiak-Witulska, D. Wiącek, A. Nawrocka, R. Rusinek, Electronic nose with polymer-composite sensors for monitoring fungal deterioration of stored rapeseed, *Int. Agrophys.*, **2017**, *31*(3), p. 317-325, doi: 10.1515/intag-2016-0064.
- [13] D. Melucci, A. Bendini, F. Tesini, S. Barbieri, A. Zappi, S. Vichi, L. Conte, T.G. Toschi, Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics, *Food Chem.*, **2016**, *204*, p. 263-273, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.02.131.
- [14] H. Rottiers, D.A. Tzompa Sosa, L. Van de Vyver, M. Hinneh, H. Everaert, J. De Wever, K. Messens, K. Dewettinck, Discrimination of Cocoa Liqueurs Based on Their Odor Fingerprint: a Fast GC Electronic Nose Suitability Study, *Food Anal. Methods*, **2019**, *12*(2), p. 475-488, doi: 10.1007/s12161-018-1379-7.
- [15] J. Chen, J. Gu, R. Zhang, Y. Mao, S. Tian, Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose, *Sensors (Switzerland)*, **2019**, *19*(3), doi: 10.3390/s19030605.
- [16] N. Aghilinategh, M.J. Dalvand, A. Anvar, Detection of ripeness grades of berries using an electronic nose, *Food Sci. Nutr.*, **2020**, *8*(9), p. 4919-4928, doi: 10.1002/fsn3.1788.
- [17] C.J. Yang, W. Ding, L.J. Ma, R. Jia, Discrimination and characterization of different intensities of goatly flavor in goat milk by means of an electronic nose, *J. Dairy Sci.*, **2015**, *98*(1), p. 55-67, doi: 10.3168/jds.2014-8512.
- [18] H.G. Jordan Voss, J.J.A. Mendes Júnior, M.E. Farinelli, S.L. Stevan, A prototype to detect the alcohol content of beers based on an electronic nose, *Sensors (Switzerland)*, **2019**, *19*(11), doi: 10.3390/s19112646.
- [19] a) P. Wiśniewska, M. Śliwińska, T. Dymerski, W. Wardencki, J. Namieśnik, Differentiation Between Spirits According to Their Botanical Origin, *Food Anal. Methods*, **2016**, *9*(4), p. 1029-1035, doi: 10.1007/s12161-015-0280-x; b) L. Strani, A. D'Alessandro, D. Ballestreri, C. Durante, M. Cocchi, Fast GC E-Nose and Chemometrics for the Rapid Assessment of Basil Aroma, *Chemosensors*, **2022**, *10*, 105, <https://doi.org/10.3390/chemosensors10030105>; c) Z. Berna, C.C. Webb, M.C. Erickson, Electronic Nose and Fast GC for Detection of Volatils from *Escherichia coli* O157:H7, *Escherichia coli* and *Salmonella* in Lettuce, *Acta Hort.*, **2013**, *1012*, p. 1255-1261, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1012.169>; d) M. Śliwińska, P. Wiśniewska, T. Dymerski, *et al.*, Evaluation of the suitability of electronic nose based on fast GC for distinguishing between the plum spirits of different geographical origins, *Eur. Food Res. Technol.*, **2016**, *242*, p. 1813-1819, <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2680-6>; e) M. Śliwińska, P. Wiśniewska, T. Dymerski *et al.*, Application of Electronic Nose Based on Fast GC for Authenticity Assessment of Polish Homemade Liqueurs Called Nalewka, *Food Anal. Methods*, **2016**, *9*, p. 2670-2681, <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0448-z>.
- [20] W. Jia, G. Liang, Z. Jiang, J. Wang, Advances in Electronic Nose Development for Application to Agricultural Products, *Food Anal. Methods*, **2019**, *12*(10), p. 2226-2240, doi: 10.1007/s12161-019-01552-1.
- [21] J. Zeravik, A. Hlavacek, K. Lacina, P. Skládal, State of the art in the field of electronic and bioelectronic tongues - towards the analysis of wines, *Electroanalysis*, **2009**, *21*(23), p. 2509-2520, doi: 10.1002/elan.200900285.
- [22] M. Podrazka, E. Bączyńska, M. Kundys, P.S. Jeleń, E.W. Nery, Electronic tongue-A tool for all tastes?, *Biosensors (Basel)*, **2017**, *8*(1), doi: 10.3390/bios8010003.
- [23] L. Escuder-Gilbert, M. Peris, Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis, *Analytica Chimica Acta*, **2010**, *665*(1), p. 15-25, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.aca.2010.03.017.
- [24] M. Bobiano, N. Rodrigues, M. Madureira, L.G. Dias, A.C. Veloso, J.A. Pereira, A.M. Peres, Unmasking Sensory Defects of Olive Oils Flavored with Basil and Oregano Using an Electronic Tongue-Chemometric Tool, *JAOCs*, **2019**, *96*(7), p. 751-760, doi: 10.1002/aocs.12249.
- [25] F. Winquist, Voltammetric electronic tongues - Basic principles and applications, *Microchimica Acta*, **2008**, *163*(1-2), p. 3-10, doi: 10.1007/s00604-007-0929-2.
- [26] X. Cetó, A. González-Calabuig, N. Crespo, S. Pérez, J. Capdevila, A. Puig-Pujol, M. Del Valle, Electronic tongues to assess wine sensory descriptors, *Talanta*, **2017**, *162*, p. 218-224, doi: 10.1016/j.talanta.2016.09.055.
- [27] M. Śliwińska, C. Garcia-Hernandez, M. Kościński, T. Dymerski, W. Wardencki, J. Namieśnik, M. Śliwińska-Bartkowiak, S. Jurga, C. Garcia-Cabezón, M.L. Rodriguez-Mendez, Discrimination of apple liqueurs (Nalewka) using a voltammetric electronic tongue, UV-Vis and Raman spectroscopy, *Sensors (Switzerland)*, **2016**, *16*(10), doi: 10.3390/s16101654.
- [28] I. Tazi, A. Choiriyah, D. Siswanta, K. Triyana, Detection of taste change of bovine and goat milk in room ambient using electronic tongue, *Indones. J. Chem.*, **2017**, *17*(3), p. 422-430, doi: 10.22146/ijc.25288.
- [29] D. Németh, G. Balázs, H.G. Daood, Z. Kovács, Z. Bodor, J.L. Zinia Zaukuu, V. Szentpéteri, Z. Kókai, N. Kappel, Standard analytical methods, sensory evaluation, NIRS and electronic tongue for sensing taste attributes of different melon varieties, *Sensors (Switzerland)*, **2019**, *19*(22), doi: 10.3390/s19225010.
- [30] W. Wang, Y. Liu, Electronic tongue for food sensory evaluation, in *Evaluation Technologies for Food Quality*, Elsevier, **2019**, p. 23-36, doi: 10.1016/B978-0-12-814217-2.00003-2.
- [31] B. Tudu, A. Jana, A. Metla, D. Ghosh, N. Bhattacharyya, R. Bandyopadhyay, Electronic nose for black tea quality evaluation by an incremental RBF network, *Sens Actuators B. Chem.*, **2009**, *138*(1), p. 90-95, doi: 10.1016/j.snb.2009.02.025.

Hala ABI RIZK<sup>1,2,3</sup>, Farah AJEJ<sup>1,2,3</sup>, Mélanie LACROIX<sup>1,2,3</sup>,  
Christophe B.Y. CORDELLA<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Recherche et de Traitement de l'Information Chimiosensorielle – LARTIC, Université Laval, Pavillon Paul-Comtois 2425, rue de l'Agriculture, Québec, QC G1V 0A6.

<sup>2</sup>Département Sciences des Aliments, Université Laval, Pavillon Paul-Comtois 2425, rue de l'Agriculture, Québec, QC G1V 0A6 Canada.

<sup>3</sup>Institut de la Nutrition et des Aliments Fonctionnels, Université Laval, Pavillon des Services, 2440 Bd Hochelaga Suite 1710, Québec, QC G1V 0A6.

\*christophe.cordella@fsaa.ulaval.ca



**ENS**



MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



**Site de ressources en Chimie pour les enseignants**

Thèmes en lien avec les **PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT**

Contenu validé par des **CHERCHEURS**

**Articles, Vidéos, Diaporamas**

**AGENDA, ACTUALITÉS**

événements, conférences, parutions scientifiques...

**http://culturesciences.chimie.ens.fr**

