



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريبيج
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم العلوم بيولوجية
Département des Sciences



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Qualité des produits et sécurité alimentaire

Thème :

**Application des biocapteurs dans le contrôle de la qualité
des aliments en industrie agro-alimentaire : Synthèse
bibliographique**

Présenté par : BENAKSAS Hanane
YAHY Ibtissem

Soutenu le : 20/09/2022, Devant le jury

	Nom Prénom	Grade	Affiliation/institution
Président :	Mr. BENYOUCEF Nabil	MCB	(Université de BBA)
Encadrant :	Mme. BOUTANA Wissem	MAB	(Université de BBA)
Examineur :	Mr. BELHADJ Mohamed Tayeb	MAA	(Université de BBA)

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah de nous avoir donnée la volonté pour accomplir ce travail.

*Nous tenons à remercier l'encadrante **Mme. Boutana Wissem** de nous avoir fait confiance et accepté de diriger ce modeste travail de Master, pour le suivi et les conseils durant toute cette étude et pour son aide dans*

*Nous saisissons l'occasion de la présentation de ce travail de Master pour adresser nos vifs remerciements au **Mr. Ben Youcef Nabil** pour nous avoir accepté de présider le jury de ce mémoire de fin d'étude*

*Notre profonde gratitude est adressé à **Mr. Belhadj Mohamed** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nous tenons à remercier chaleureusement nos chers parents, nos chères sœurs, nos amis(es), pour leur soutien et leurs patiences.

Nous remercions également toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci à tous

DEDICACE

*En manière de reconnaissance, je dédie
Ce travail :*

** À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la
flamme de mon cœur Maman que j'adore. Tu m'as mis à
l'école alors que tu n'as jamais eu la chance d'y aller un
jour, tes prières et ta bénédiction m'ont été d'un grand
secours. Merci Maman*

*Ensuite À mon exemple éternel, merci Mon Père pour
tout l'amour, l'éducation et le soutien que tu m'as apportés
moral, que Dieu te garde et te bénisse, à toi Mon Père
À avec qui je partage mais secrets, ma vie mon bonheur,
Mes chères sœurs*

*Enfin À mon bouclier et source de ma force, Mes frères
Aux bourgeons d'enfance, Mes belles petites chéries
À qui sont ma motivation, Roji et Kadjer
Ainsi qu'à tous Mes amis, proche*

I.YAH

DEDICACE

*C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :
À mes chers Parents pour leur soutien, leur patience, leur
encouragement durant mon parcours scolaire.*

*À Mon soutien moral et source de bonheur, mon époux
Abdelhak pour l'encouragement et l'aide qu'il m'a
toujours accordé*

À Mon Petit ange Syad

*À mes chères frères Amine, Ahmed et Azzedine et ma
chère sœur Leila*

À tous mes amis

H.BENAKSAS

Table des Matières

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	1
CHAPITRE I : Les biocapteurs	
I.1. Historique des biocapteurs.....	3
I.2. Définition	3
I.3. Structure et principe de fonctionnement	4
I.4. Classification des biocapteurs.....	4
I.4.1. Selon le type de bio-récepteurs	4
I.4.2. Selon le type de transducteur	6
I.5. Caractéristiques des biocapteurs.....	11
CHAPITRE II : Application des biocapteurs dans le domaine Agro-Alimentaire	
II. Domaines d'applications des biocapteurs	4
II.1. Composés divers contenant dans les aliments	4
II.1.1. Sucres.....	4
II.1.2. Alcools.....	4
II.1.3. Acides organiques.....	4
II.1.4. Amines biogéniques	5
II.1.5. Polyphénols	5
II.2. Microorganismes pathogènes	6
II.3. Contaminants chimiques (pesticides)	6
II.4. Toxine d'Origine bactérienne.....	6
II.5. Organisme Génétiquement Modifié (OGM)	7
II.6. Antibiotique.....	7
CHAPITRE III : Synthèse des articles	
III.1 Application des biocapteurs pour la détection des bactéries et les virus dans les aliments et l'eau	9

III.2. Avancées récentes et perspectives d'avenir dans l'utilisation des biocapteurs à base d'aptamères dans l'analyse de la sécurité alimentaire	10
III.3. Conception de capteurs et de biocapteurs pour la détection des composés organiques volatils (COV)	13
Conclusion.....	16
Références Bibliographiques	
Résumés	

Liste des abréviations

AchE : Acétylcholine estérase enzymatique

ADN :Acide désoxyribonucléique

AEE : Association Européenne pour l'environnement

AF : Aflatoxine

ARN :Acide ribonucléique

CLFC :Le Conseil de liaison des Forces Canadiennes

COV :Composé organique volatil

ELISA : Enzyme linked immuno sorbent assay (Essai immuno-enzymatique)

EPA : Agence de protection de l'environnement

ESIPT : Excited state intramolecular proton transfer

FAO : Food and agriculture organisation

GC : Gas Chromatography

GHZ : Gigahertz

GNB : Gouvernement du Nouveau -Brunswick

GNP : Gross national product

GQDs : Graphene quantum dots

HPLC :High performance liquide chromatography (chromatographie en phase liquide à haute performance)

HRP :Peroxydase de raifort horséradish

IgG : Immuno globuline G

IUPAC :Union international de chimie pure et appliqué

LMR :Limite maximal des résidus

MC : mass spectrometry

NPS : Net Promoter Score

OGM : Organisme génétiquement modifiés

OMS : Organisation mondiale de la santé

OTA : Online Tourism Agency - Agence de tourisme en ligne

PB : Symbole chimique du plomb

pH : potentiel hydrogène

PM : poids moléculaire

PPM : Partie Par Million.

SEB : Staphylococcus Entérotoxine B

SPR : Surface résonance de plasmon

TC : Tétracycline

TMA : Tierce Maintenance Applicative

UFC :Unité Formant Colonie

Liste des figures

Figure 1. Représentation Schématique d'un biocapteur	4
Figure 2. Différents types de bio-récepteurs	5
Figure 3. Schéma d'un biocapteur thermique	7
Figure 4. Schéma du principe d'une capture à fibre	7
Figure 5. Représentation d'une détection électrochimique	8
Figure 6. Principe de mesure potentiométrique	8
Figure 7. Principe de mesure ampérométrique	9
Figure 8. Principe de mesure conductimétrique	10
Figure 9. Schéma d'un biocapteur piézoélectrique	10
Figure 10. Méthodes de recherche utilisées dans cette étude	10
Figure 11. Schéma du principe électrochimique pour la détection simultanée de deux pesticides	11
Figure 12. Changement de couleur du capteur de papier colorimétrique imprimable	14

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La qualité et la sécurité des denrées alimentaire présentes sur le marché tendent ces dernières années à être de plus en plus prises en considération par le consommateur (*Agueh et Degbey ;2015*), l'organisation mondial de la santé (OMS) et l'organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ont défini la sécurité sanitaire des aliments comme une démarche qui englobe toutes les mesures destinées à proposer des aliments aussi surs que possible (*El Hassani ;2018*).

Pour le contrôle de la qualité des aliments et les produits alimentaire, l'industrie agroalimentaire a de plus en plus besoin de techniques analytiques fiable et peu coûteuse (*Vidic et al ;2019*). Ce besoin provient d'une part d'une demande des organismes de régulation, mais aussi d'un plus grand intérêt porté par le consommateur à la fiabilité des produits qu'il consomme. La contribution des techniques analytiques devient plus importante pour le control des matières premières, la vérification du contenu des produits, l'évaluation de leur fraîcheur et aussi la détection des contaminants (*Kengne et Rosine ;2011*).

En effet, ces dernières décennies ont vu l'apparition des capteurs biologiques appelés plus souvent biocapteurs. Généralement, la conception de biocapteur est basée sur l'association d'une entité biologique faisant office de bio-récepteur à un transducteur physique. Ce bio-récepteur assure la bio- reconnaissance lors de l'interaction avec l'analyte cible. Elle est aisément mesurable et peut être directement associée à la concentration de l'analyte présent dans l'échantillon à analyser (*Choi et al ;2018*).

Ces nouveaux dispositifs d'analyse ont connu un développement assez remarquable grâce aux demandes de contrôle notamment en hygiène dans différents domaines tels que l'alimentation, la sécurité domestique et industrielle (*Vidic et al ;2017*).

Dans ce contexte, nous avons focalisé l'objectif de ce présent travail de mémoire sur l'étude bibliographique des biocapteurs comme outil d'analyse dans les industries agroalimentaire.

Le manuscrit est subdivisé en trois chapitres ; le premier chapitre présente des généralités sur la structure, le principe et la classification des biocapteurs ; le deuxième chapitre est réservé aux différentes applications des biocapteurs dans les analyses de qualité au niveau des industries agroalimentaire ; le dernier chapitre représente une synthèse de trois articles sur l'utilisation des nouveaux capteurs dans la détection des différent polluant et agent pathogène existant dans les aliments et dans l'eau.

CHAPITRE I

LES BIOCAPTEURS

La technologie d'analyse basée sur des biocapteurs possède un champ d'application extrêmement large, dans les grands secteurs industriels, y compris les produits pharmaceutiques, les produits de santé, l'alimentation, l'agriculture, l'environnement et l'eau (**Liu et al ;2014**). En lien avec les inconvénients des méthodes conventionnelles, il y a un besoin croissant de développer des biocapteurs hautement sélectifs et efficaces pour le contrôle rapide, simple et économique d'une large gamme de molécules dans de nombreux domaines tels que l'industrie alimentaire (**Manzano et al., 2018 ; Vidic et al ., 2017**).

I.1. HISTORIQUE DES BIOCAPTEURS

Le premier biocapteur développé a été l'œuvre de Leland Clark en 1956 dans le but de déterminer la concentration en oxygène dissous dans le sang (**Leland, 1956**). Leland Clark a été connu Comme le « père des biocapteurs » et son invention de l'électrode à oxygène porte son nom : Clark électrode (**Heineman et al., 2006**). En 1962, ce biocapteur a été amélioré par le même chercheur afin de mesurer le taux de glucose dans le sang (**Clark et Lyon, 1962**), suivi par la découverte du premier biocapteur potentiométrique permettant de détecter l'urée par Guilbault et Montalvo en 1969 (**Guilbault et Montalvo, 1969**).

L'année 1975, a connu la découverte du premier immuno-capteur dédié au dosage de l'éthanol et l'acide lactique par (**Suzuki et al., 1975**). Au cours des dernières décennies, le domaine des biocapteurs a connu une ampleur remarquable sous la pression de divers domaines d'applications. Leur caractère compact et portatif ainsi que leur grande spécificité et sensibilité font d'eux une des meilleures alternatives aux techniques analytiques existantes.

I.2. DEFINITION

D'après l'union international de chimie pure et appliquée (**IUPAC**), un biocapteur est un dispositif intégré fournissant des informations spécifiques quantitatives ou semi-quantitatives par le biais d'un élément de reconnaissance d'origine biologique en contact direct avec un élément de transduction. Le concept biocapteur regroupe tout dispositif de mesure défini par un couple de ligands biologiques sélectifs liés à un transducteur qui transforme un phénomène biochimique en un signal mesurable (**Thévenot et al., 2001**).

Les biocapteurs font partie des techniques, fiables plus rapides et plus simples, capable de détecter des analytes en une seule analyse, loin des méthodes d'extraction lentes, coûteuses et nécessitant des agent nocifs (**Ronkainen et al., 2010**).

I.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un biocapteur est issu de l'association d'un élément biologique (enzyme ; anticorps ; antigène fragment d'ADN, d'ARN ou microorganisme) possédant une fonction de reconnaissance spécifique et un élément transducteur (électrode, microbalance à quartz, fibre optique) (Figure 1), assurant le transfert de l'événement biologique donc reconnaissance de l'analyte et le transforme en un signal exploitable électrique ou lumineux (**Bizet *et al.*, 1995**).

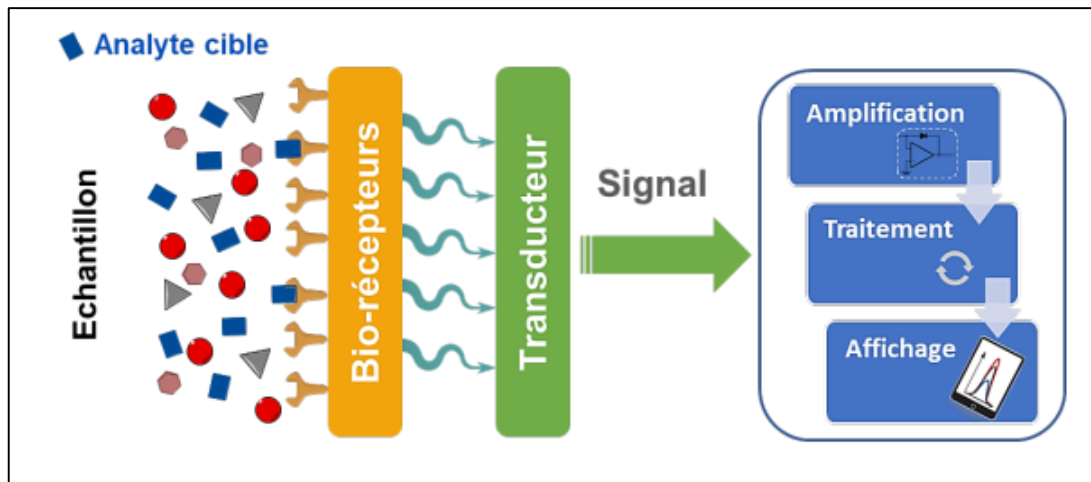


Figure 1. Représentation Schématique d'un biocapteur (Wise et Wingard,1991)

Un biocapteur est aussi un outil, d'analyse qualitative ou quantitative permettant de détecter la présence ou d'estimer la concentration d'éléments chimique des molécules par le biais d'un élément sensible d'origine biologique (**Wang, 2001**).

I.4. CLASSIFICATION DES BIOCAPTEURS

Les biocapteurs peuvent être classés suivant différents critères (**Velusamy *et al.*, 2010**) :

- Selon le type de bio-récepteurs : biocapteurs enzymatiques, immunologiques, etc.
- Selon le type de transducteur : biocapteurs optiques, électrochimiques, thermiques, etc.

I.4.1. Selon le type de bio-récepteurs

Un bio-récepteur (Figure 2) est une espèce moléculaire biologique (par exemple un anticorps, un enzyme, une protéine, ou un acide nucléique) ou un système biologique vivant (par exemple, des cellules, des tissus ou des organismes entiers) qui utilise un mécanisme de reconnaissance biochimique (**Vo-Dinh et Cullum., 2000**).

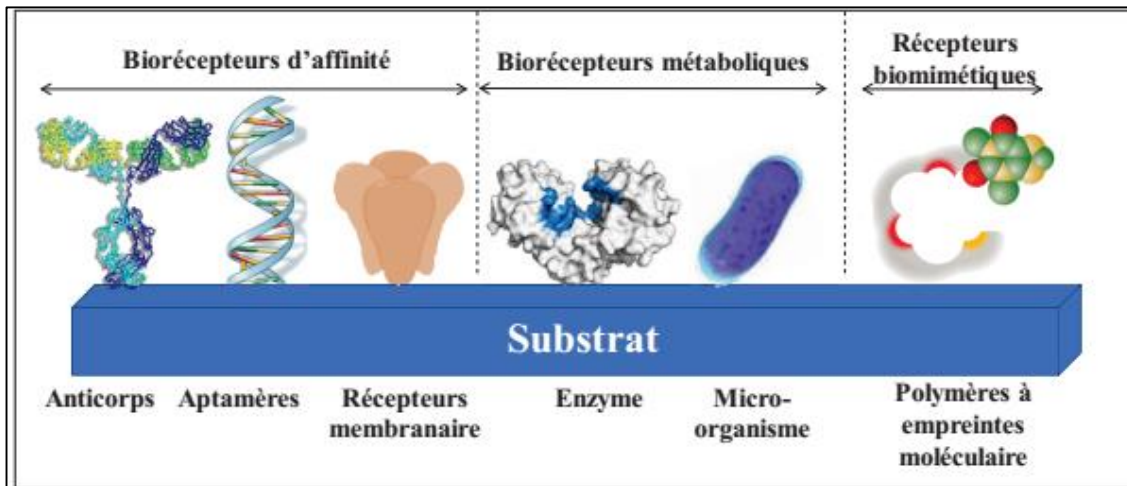


Figure 2. Différents types de bio-récepteurs (Ben Aissa, 2020).

Les enzymes

Les enzymes sont les plus utilisées et les plus commercialisées. En effet, elles présentent un grand nombre d'avantages notamment la reproductibilité des lots mais par contre il peut y avoir une instabilité de leur fonctionnement et la nécessité d'utiliser un cofacteur ou plusieurs enzymes associées pour un même biocapteur (Delvaux et Dumoustier-Champagne., 2001).

Les microorganismes (cellules entières)

Les systèmes de reconnaissance moléculaire des cellules entières des micro-organismes ne nécessitent pas des étapes d'extraction et de purification des enzymes, avec l'avantage de l'adaptation facile à des modifications de pH et de température. Leur sélectivité et leur sensibilité sont toutefois le plus souvent limitées, à cause de leur faible spécificité vis-à-vis des interférents (Rechetnikov *et al.*, 2008).

Les microorganismes utilisés dans l'élaboration de ce type de biocapteurs sont essentiellement des bactéries, des levures et des champignons (Goers *et al* ; 2017).

Les tissus et organites

Ces biocapteurs sont de nouvelles structures utilisant des cellules vivantes comme bio-récepteurs aussi bien d'origine animale que végétale, pour déterminer le changement physiologique lorsqu'on applique un stimulus externe ou interne.

La bio-détection se fait par un tissu biologique qui peut être soit une cellule entière, un micro-organisme ou un composant cellulaire qui peut interagir avec certaines espèces (bactéries, enzymes) (Santi et Guy, 1996). Ils sont surtout utilisés pour la détection des aminoacides de

par leur robustesse et leur bonne cohésion (Eggins *et al.*, 1997). Egalement, Ce type de bioélément contrairement aux enzymes ne nécessite pas d'extraction ni de purification ce qui réduit le cout du capteur (Bourjilat ., 2017).

Les anticorps antigènes

Le développement de biocapteurs immunologiques s'appuie sur la reconnaissance moléculaire des anticorps-antigènes. La réaction de couplage antigène-anticorps peut alors être suivie par détection électrochimique ou optique. Un grand nombre de travaux ont eu recours au marquage de l'anticorps ou de l'antigène par une enzyme qui permet de suivre facilement la réaction de reconnaissance moléculaire. (Blake *et al.*, 2001 ; Trilling *et al.*, 2013).

L'ADN

L'utilisation de séquences d'ADN comme bio-récepteur a permis de grand progrès dans le génomique. La bio détection est réalisée lorsque la séquence de base (séquence connue) est reliée à la séquence complémentaire appelée aussi sonde qui est marquée via un composé optiquement ou électriquement détectable (Hajihosseini *et al.*, 2016). Les acides nucléiques sont facilement synthétisables, réutilisables et spécifiques car ils permettent de mesurer la présence d'une séquence particulière (Goral *et al.*, 2006).

Des biocapteurs utilisant un simple brin d'ADN ont été développés pour la détection de cancers (Mansor *et al.*, 2014) et de bactéries pathogènes (Luo *et al.*, 2013).

I.4.2. Selon le type de transducteur

Le transducteur est l'élément physique dans le biocapteur qui sert à traduire la modification biochimique suite à l'interaction analyte bio-récepteur pour le convertir en un signal électrique mesurable (Tlili, 2006).

Différents types de transducteurs sont utilisés pour la conception de biocapteurs. En effet le transducteur peut être optique, thermique ou électrochimique (Guedri ,2010).

Transducteurs thermiques

Les transducteurs thermiques aussi appelés capteurs enthalpimétriques (Figure 3) (Mosbach et Danielsson, 1974), sont destinés à déterminer la concentration d'un substrat par la variation d'enthalpie associée à des réactions exo ou endothermiques (Ramanathan et Danielsson., 2001). Leur principe est basé sur l'immobilisation des récepteurs capables de mesurer les changements d'enthalpie ou de température due aux réactions avec l'analyte (Casadio *et al.*, 2017).

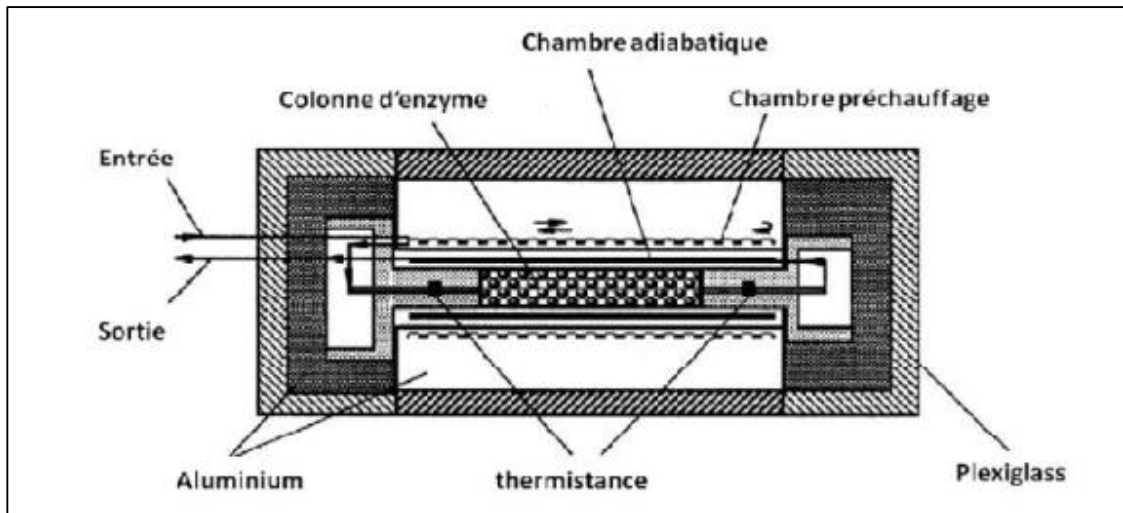


Figure 3. Schéma d'un biocapteur thermique (Jarrar, 2011).

Transducteurs optiques

Les transducteurs optiques sont devenus populaires durant ces dernières années avec plusieurs dispositifs commercialement disponibles, leur principe (figure 4) est basé sur certains phénomènes tels que la fluorescence (Sinibaldi *et al.*, 2015). Ce type de transducteurs permet d'effectuer des mesures in situ et en temps réel avec une bonne sensibilité et des faibles temps de réponse (Spasic *et al.*, 2017). Une autre particularité est leur capacité de détection simultanée de plusieurs analytes. Les transducteurs optiques utilisent des technologies diverses basées sur des phénomènes optiques, et sont le résultat d'interactions entre l'analyte et le récepteur (Damborsky *et al.*, 2016).

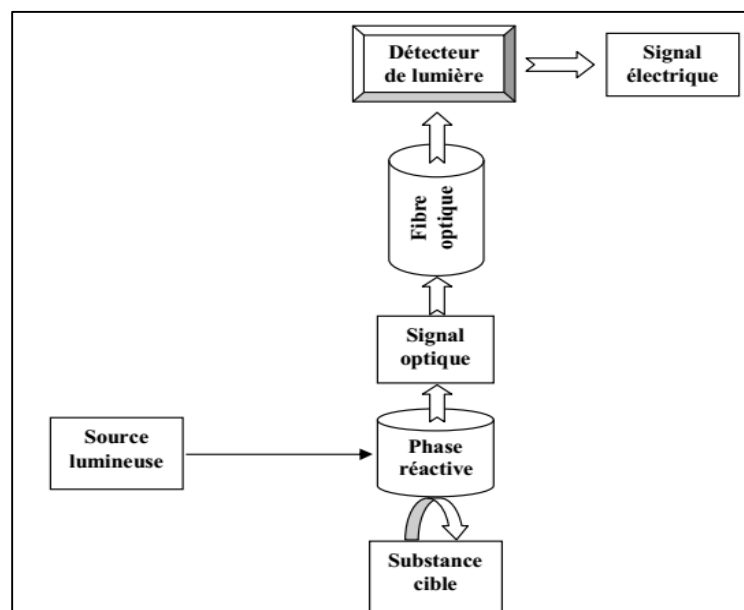


Figure 4. Schéma du principe d'un capteur à fibre (Lahmani *et al.*, 2007).

Transducteurs électrochimiques

Ce type de biocapteurs est un système capable de fournir une détection spécifique quantitative (Thévenot *et al.*, 2001). Il existe différents types de biocapteur électrochimique pour convertir l'information chimique en un signal électrique mesurable (Pohanka et Skládal, 2008). Le principe des biocapteurs électrochimique repose sur l'immobilisation de bio-récepteurs sur une électrode (Ronkainen et Heineman, 2010). Des réactions chimiques entre les bio-récepteurs immobilisés au contact direct d'un élément de transduction électrochimique et des analytes cibles (Pohanka et Skládal, 2008).

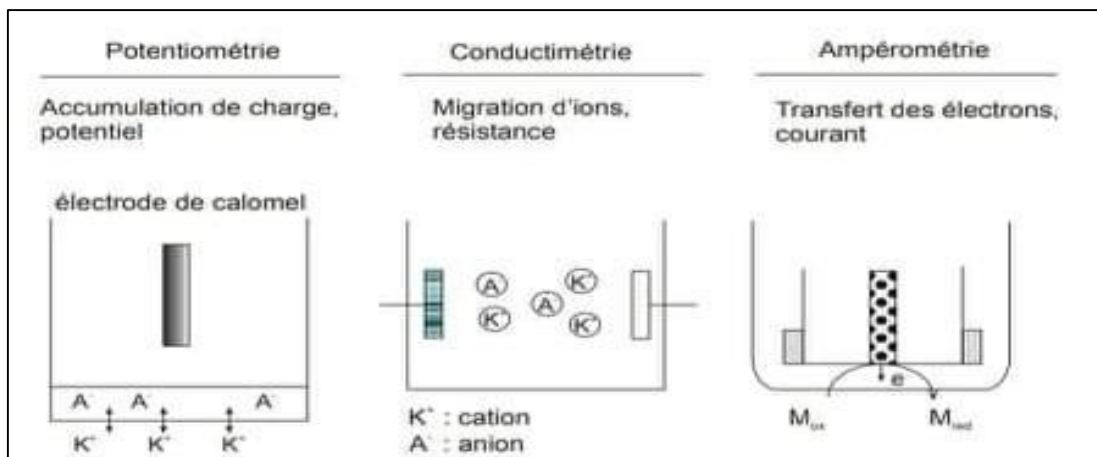


Figure 5. Représentation d'une détection électrochimique (Jarrar, 2011).

Transducteurs potentiométriques

Ce type de transducteur est basé sur la mesure de la différence du potentiel établi entre une électrode de référence à potentiel constant et une électrode indicatrice sous une intensité de courant nulle (Figure 6) (Dupont, 2010).

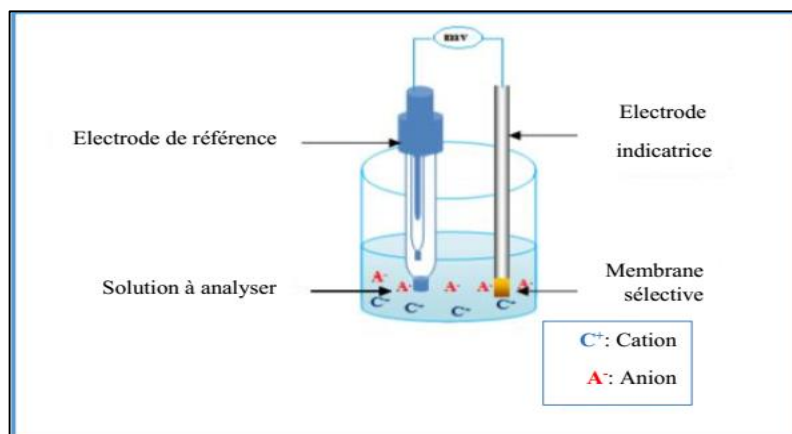


Figure 6. Principe de mesure potentiométrique (Hafaid, 2009).

Les potentiels mesurés sont proportionnels à la concentration de l'analyte dans la solution qui est généralement le substrat d'une enzyme, d'une cellule entière, d'un anticorps, ou d'une molécule d'ADN (Koncki, 2007).

Transducteurs ampérométriques

Ce type de transducteur est caractérisé par sa haute sensibilité et sa large gamme de linéarité comparé aux transducteurs potentiométriques (Barhoumi *et al.*, 2018). Ces transducteurs mesurent le courant généré par une réaction d'oxydo- réduction entre une électrode de travail et une électrode de référence à un potentiel constant (figure 7). La valeur de ce courant est proportionnelle à la concentration d'analytes en solution (Dahchar ., 2017).

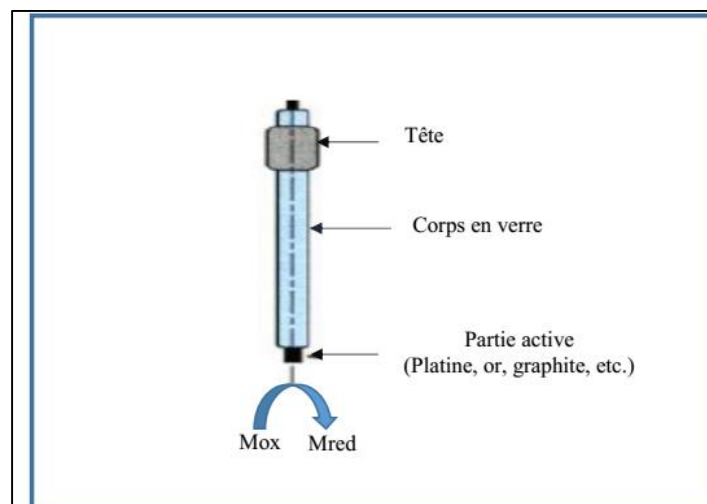


Figure 7. Principe de mesure ampérométrique (Hafaid, 2009).

Transducteurs conductimétriques

Les transducteurs conductimétriques (figure 8) sont des alternatives aux potentiométriques et ampérométriques, leur principe repose sur la mesure des propriétés conductimétriques d'un milieu entre deux électrodes parcourues par un courant alternatif. La conductivité d'un milieu est linéairement reliée à la nature des ions en solution et de leurs concentrations (Zura *et al.*, 2014).

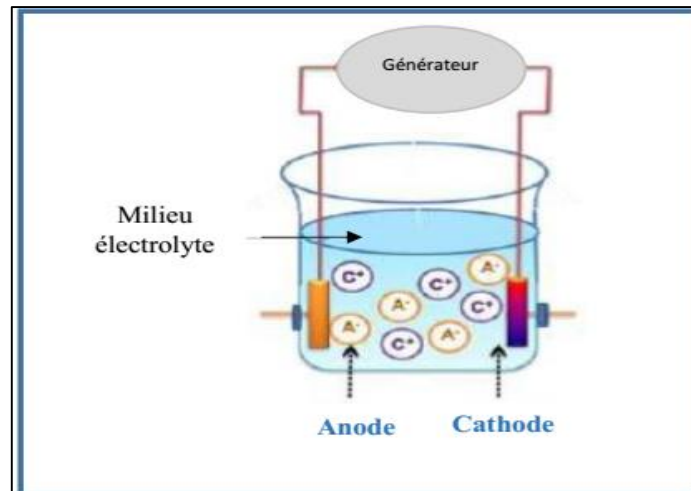


Figure 8. Principe de mesure conductimétrique (Hafaid, 2009).

Piézo-électriques

Le concept de la transduction piézoélectrique est basé sur la mesure de la masse d'un échantillon déposé sur la surface d'un cristal piézoélectrique par l'intermédiaire de la variation de sa fréquence de résonance (Ramanathan et Danielsson., 2001). Ces cristaux piézoélectriques sont donc capables de traduire un effet mécanique en signal électrique et réciproquement. Ainsi, en suivant la variation de la fréquence de résonance du quartz lors de la réaction, on peut accéder à la variation de la masse (Thien , 2019).

Des biocapteurs piézoélectriques (figure 9) sont développés dans le domaine médical, pour la détection de virus, des antigènes ou des anticorps, dans le contrôle environnemental, pour la détection de métaux lourds et des pesticides (Storii *et al.*, 1998).

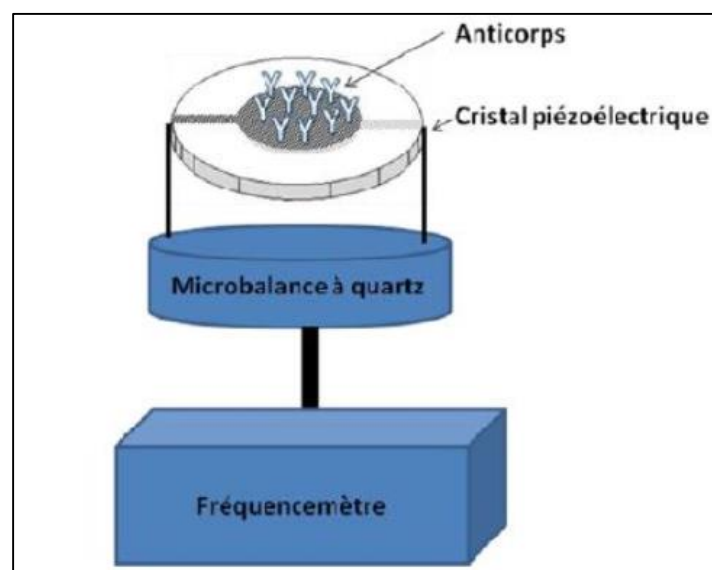


Figure 9. Schéma d'un biocapteur piézoélectrique (Jarrar, 2011).

I.5. CARACTERISTIQUES DES BIOCAPTEURS

Il s'agit des caractéristiques qui servent à évaluer un capteur et ses qualités analytiques. Les caractéristiques les plus exploitées sont les suivantes :

a. Sélectivité : c'est la capacité du biocapteur à distinguer entre des substrats différents. C'est un paramètre qui dépend principalement du composant biologique, bien que parfois le choix du transducteur puisse contribuer à la sélectivité.

b. Sensibilité : Ce paramètre correspond au rapport entre l'accroissement de la réponse du capteur et la variation correspondante de la grandeur à mesurer

c. Reproductibilité : c'est parmi les paramètres les plus importants. Il indique la capacité du biocapteur à donner des réponses très voisines pour des mesures Répétées de la même quantité de la grandeur à mesurer.

d. Exactitude : C'est l'accord entre le résultat de la mesure et la valeur vrai de la grandeur mesurée et l'écart est appelé erreur absolue.

e. Limite de détection : C'est la plus petite valeur de la grandeur à mesurer pouvant être détectée par le biocapteur d'une façon significative (**El Hassani, 2018**).

CHAPITRE II :
Application des biocapteurs
dans le domaine Agro-
Alimentaire

Le contrôle de la qualité des aliments est une étape importante dans la transformation des aliments, En termes de qualité des matières premières et contamination des aliments pendant la transformation (**Boeckel et Thomas , 2003**).

II. DOMAINES D'APPLICATIONS DES BIOCAPTEURS

Les applications des biocapteurs varient selon différents domaines tels que la médecine, l'alimentation et l'environnement. En technologie alimentaire, les contaminants biologiques et chimiques devraient être déterminés, car ils sont d'une importance pour la sécurité et la qualité des aliments. (**Caparros et al., 2015**).

Les biocapteurs optiques offrent de nombreux avantages par rapport à d'autres types de biocapteurs, ils sont utilisés pour la détection directe de bactéries dans les produits alimentaires (**Gaudin valérie, 2016**). Ainsi que pour le contrôle des processus de fermentation et pour la détection de l'alcool et des hydrates de Carbon (**Dahouenon et al ., 2012**).

II.1. COMPOSES DIVERS CONTENU DANS LES ALIMENTS

II.1.1. Sucres

Le glucose (monosaccharide) réagit sélectivement avec certaines enzymes, comme la glucose oxydase et la glucose déshydrogénase. Ces enzymes sont également considérés comme sélectives à un seul des isomères optiques et ne réagissent pas avec les autres, cette sélectivité des enzymes permet de développer un biocapteur sélectif pour surveiller le niveau du glucose dans le domaine de santé et aussi dans l'alimentation (**Dandach Amar, 2018**).

II.1.2. Alcools

L'enzyme alcool oxydase permet de préparer une électrode ampérométrique à alcool et de mesurer la concentration d'alcool de manière sélective et sensible. Les électrodes à alcool ont été développées par différents chercheurs pour mesurer la concentration d'alcool dans différents échantillons alimentaires tels que la bière et le vin (**Boisse et Thanh Thury nguyen., 2013**).

II.1.3. Acides organiques

L'acide benzoïque et ses sels sont utilisés comme agent de conservation dans divers produits alimentaire pour leur activité antimicrobienne visant à préserver et protéger les aliments contre les altérations (**Touaitia et al., 2021**). La détermination de l'acide benzoïque dans les produits alimentaires est essentielle dans le contrôle de la qualité et la protection des consommateurs

(San *et al.*, 2007). Ainsi, l'utilisation d'une électrode enzymatique ampérométrique pour la mesure des acides organiques dans les aliments peut être avantageuse

- ✓ En raison de sa capacité à mesurer les acides organiques.
- ✓ En raison de la sélectivité, de la possibilité d'une analyse rapide dans les laboratoires et dans les usines (Zajoncova *et al.* , 2004).

II.1.4. Amines biogéniques

Ce sont des bases organiques de faible poids moléculaire, synthétisées et dégradées pendant le métabolisme normal des animaux, des plantes et des microorganismes. L'histamine a été mise en œuvre comme l'agent causal dans plusieurs foyers d'intoxication alimentaire, la toxicité de l'histamine est augmentée par la présence d'autres amines telles que le cadavérine, la putrescine et la tyramine (Voet donald., 2016).

Une électrode d'amine biogénique ampérométrique a été conçue par (Muresan *et al.*, 2008), où une enzyme de type amine-oxydase a été combinée avec de la peroxydase sur une surface d'électrode. L'électrode d'amine biogénique développée a été appliquée avec succès pour la mesure de la Tyramine, Putrescine, Cadavérine, Histamine, l'Agmatine et la Spermidine dans les échantillons de poissons.

II.1.5. Polyphénols

En science alimentaire, la recherche des polyphénols vise à les détecter et à les quantifier par deux types différents de biocapteurs qui sont signalés dans le domaine des antioxydants. Les biocapteurs ampérométriques sont utilisés pour la détection des mono- et polyphénols (principaux composés antioxydants dans les aliments) et ont été développés sur la base d'enzymes comme la tyrosinase, la lactase ou la peroxydase (Boubezari, 2021). D'autre part, et pour l'évaluation de la capacité antioxydante, les biocapteurs électrochimiques sont basés sur l'activité de piégeage des radicaux libres (Sanchez-Moreno *et al.*, 1999 ; Lu et Yeap Foo ., 2000).

Différents biocapteurs électrochimiques basés sur (polyphénol) ou la peroxydase ont été proposés pour la détection des composés phénoliques (Ben Ali, 2021).

Exemple d'un biocapteur ampérique et spécifique pour dégrader la caféine et la détermination de la caféine dans les solutions. L'ensemble des cellules de *Pseudomonas alcaligenes* MTCC5264 ayant la capacité de dégrader la caféine, ont été immobilisée sur une membrane de cellophane par réticulation covalente (Boudjerda *et al.*, 2008).

II.2. Microorganismes pathogènes

La détection et l'identification des agents pathogènes dans les aliments est l'une des plus importantes exigences dans le traitement des aliments et les méthodes classiques d'identification microbienne, qui comprend l'enrichissement, l'isolement et l'incubation. Ces méthodes qui prennent beaucoup de temps ont incité les chercheurs à faire recours à d'autres méthodes plus rapides ; les biocapteurs **(Dubois-Brissonnet & Guillier, 2020)**.

La détection immunologique des bactéries, des cellules, des spores, des virus et des toxines est plus sensible, spécifique, reproductible et fiable. **(Kahlouche, 2012)**. De nombreux immuno- dosages commerciaux sont disponibles pour la détection d'une grande variété de micro-organismes et de leurs produits dans les aliments. De nombreux kits de test sont disponibles, y compris l'immuno- diffusion, le test immuno- enzymatique (ELISA) et l'utilisation d'anticorps spécifiques pour capturer et concentrer l'organisme **(Ayad, 2018)**.

II.3. Contaminants chimiques (pesticides)

Toute substance ou mélange de substances destiné à prévenir, détruire, repousser ou atténuer un organisme nuisible est appelé pesticide **(FAO, 2002)**. Certains des pesticides les plus couramment utilisés inhibent l'activité enzymatique de l'acétylcholinestérase (AChE), qui dégrade l'acétylcholine (ACh) en produisant de la choline et un groupe acétate **(El Almi, 2017)**.

L'inhibition de l'AChE entraîne une augmentation de la concentration d'ACh, ce qui peut provoquer une hyperstimulation du tissu musculaire et entraîner une paralysie. À fortes doses, les inhibiteurs de l'AChE peuvent entraîner la mort par insuffisance respiratoire **(Leroy, 2016)**.

En raison de la toxicité du pesticide, sa concentration doit être mesurée. L'un des moyens pratiques de mesurer la concentration de pesticide est de surveiller l'effet d'inhibition des pesticides sur l'enzyme AChE, L'activité de l'enzyme AChE peut être contrôlée par une électrode ampérométrique en présence d'une quantité constante d'ACh dans des conditions de réaction standard **(Sine, 2022)**.

II.4. Toxine d'origine microbienne

Les microorganismes utilisés dans l'élaboration de ce type de biocapteurs sont essentiellement des bactéries, des levures et des champignons **(Goers, 2017)**.

L'infection par des champignons et la production d'aflatoxine (AF) peut intervenir à chacune des étapes de la croissance des plantes. Récemment, un biocapteur fluorimétrique a été développé pour détecter et quantifier les aflatoxines dans le maïs, les graines de coton, les cacahuètes et certaines épices **(Dridi, 2016)**. Rajeb *et al.* (2009) ont développé une électrode

enzymatique ampérométrique pour la mesure des AFs basée sur l'inhibition de l'ACHe par l'aflatoxine B1(AFB1).

Un test immuno- chromatographique basé sur des nanoparticules d'or a été développé par **Huang (2007)** pour la détection rapide de *S. aureus*. **Yang et al. (2008)** ont utilisé des nanoparticules d'or pour la détection de l'entérotoxine B (SEB ; protéine de la paroi cellulaire de *S. aureus*) dans les aliments. Les nanoparticules d'or ont été partiellement immobilisées sur une surface de polycarbonate et ensuite conjuguées avec des IgG purifiées par affinité anti-SEB de lapin. L'immuno- capteur nanoparticules d'or - anticorps a ensuite été incubé avec différentes concentrations de SEB pendant 45 minutes. Il a ensuite été exposé à des IgG anti-SEB conjuguées à du HRP cette technique permet de détecter l'agent pathogène facilement.

Exemple : Il existe des biosenseurs d'acides nucléiques, leurs applications pour l'industrie des produits laitiers pour détecter l'agent pathogènes produisant des toxines tels que *Salmonella*, *Listeria*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* (**Boudjerda et al. , 2008**).

II.5. Organisme génétiquement modifiés (OGM)

Bien que les OGM constituent un moyen alternatif de lutter contre la famine ou d'améliorer la qualité des aliments, plusieurs questions subsistent quant à leurs avantages ou leur utilisation (**Daheey et Pelletier., 2014**). Plusieurs méthodes ont été utilisées pour détecter le contenu en OGM des aliments. Cependant, les biocapteurs électrochimiques d'ADN offrent une alternative fiable pour la détection des OGM dans les aliments (**Shehata, 2005 ; Ahmed et al. , 2008**).

II.6. Antibiotiques

Un immuno- capteur a été mis au point pour la détection des antibiotiques sulfonamides dans le lait (**Adrain et al., 2009**). Le système développé permettait de distinguer le lait contaminé par des antibiotiques sulfamides (sulfapyridine) à un niveau égal ou supérieur à la limite maximale de résidus (LMR) (100 µg/L) (**Zamoum., 2019**).

La détection de la Néomycine et la Gentamycine est réalisée par un biocapteur à micro réseau à l'aide d'un système d'imagerie SPR (**Luan et al., 2020**). Le principe repose sur l'utilisation d'une surface de verre recouverte d'or sur laquelle de l'ADN dénaturé a été immobilisé en couches alternées avec un polymère cationique de détection de l'antibiotique dans les échantillons de lait est de 3 µg/ml. (**Cao et al., 2007**).

Exemple : Un biocapteur utilise la pénicillinase immobilisée pour la détection de la pénicilline dans le secteur du lait (**Blanchette, 2014**).

CHAPITRE III:

Synthèse des articles

La présente partie se focalise sur une analyse générale et une synthèse de trois axes de recherches sous forme d'articles qui sont publiés récemment, en faisant des liaisons avec la thématique du présent travail.

III.1 APPLICATION DES BIOCAPTEURS POUR LA DETECTION DES BACTERIES ET LES VIRUS DANS LES ALIMENTS ET L'EAU (KOTSIRI *ET AL* ; 2022).

- Introduction

Les bactéries pathogènes présentes dans l'aliment et l'eau constituent une menace pour la production animale et la sécurité alimentaires. Ils Sont tous responsables de la propagation des maladies d'origine alimentaire. Selon l'OMS, les aliments qui contiennent des contaminants sont considérés comme impropres à la consommation humaine. Le développement d'une méthode rapide sélective et spécifique de détection des agents pathogènes est un défi crucial dans le contrôle des maladies facilement transmissibles, des efforts sont nécessaire maintenant, pour élaborés de nouveaux outils pouvant être appliqués pour identifiés les agents pathogènes et surveiller leur propagation pour éviter les maladies.

- Analyse

Ces dernières années, les biocapteurs sont considérés comme de puissant outils émergents pour la détection de divers bio marqueurs pour la surveillance sanitaire et environnementale (**kotsiri *et al.*, 2019 ; manzouo *et al.*, 2018**).

Cette étude résume un aperçu des dernières technologies dans les biocapteurs pour la détection des bactéries et des virus dans l'eau et les denrées alimentaires. **Li *et al.* (2018)** ont démontré un dispositif microfluidique encapsulant un guide coplanaire d'ondes pour la thermorégulation directe et indirect des cellules d'E. Coli en suspension dans des milieux de cultures de micro-ondes sur une gamme de fréquences de 0,5 GHZ à 20 GHZ la détection a été faite en utilisant des mesures des réflexion de micro-onde causée par une diminution de la conductance et de la permittivité du cytoplasme après la mort cellulaire.

Un outil a été évalué pour le diagnostic de la mammite bovine dans le secteur agricole causée par *Streptococcies agalactie*. Des échantillons de lait ont été sélectionnés et mélangés avec une solution qui combine des anticorps spécifiques et des nanoparticules magnétiques pour obtenir une détection rapide et précise en utilisant un cymomètre magnéto résistif 19 de laboratoire sur puce (**Duarte *et al.*, 2016**). Cette méthode de détection immunologique a permis la reconnaissance de 100UFC/ml.

Le besoin immédiat pour la détection de certain type de micro-organismes dans l'industrie alimentaire a conduit au développement de 20 biocapteur avec des peptides antimicrobiens

spécifiques à l'espèce selon les capacités de ciblage et de liaison (Lillehoj *et al.*, 2014). *Streptococcus mutans* et *Pseudomonas aeruginosa* ont interagi avec des peptides spécifiques immobilisés sur une surface d'or grâce à la chimie de la cystéine-or, qui a généré un signal électrique. La concentration minimale détectée était de 10⁵ UFC/ml sur une période de 25 min.

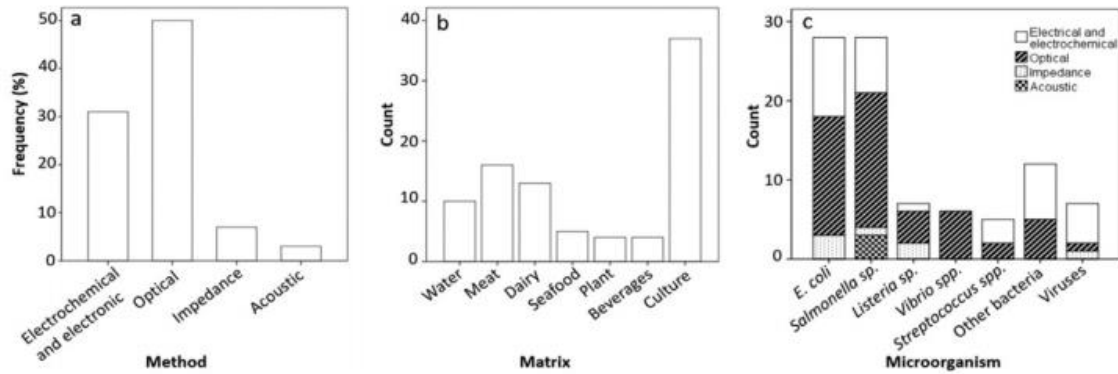


Figure 10. – Méthodes de recherche utilisées dans l'étude.

- (a) Pourcentage de méthodes utilisées dans les capteurs dans les articles éligibles ;
- (b) Pourcentage d'articles avec biocapteurs selon les denrées ;
- (c) utilisation de la méthode selon le micro-organisme.

- Conclusion

Dans les années à venir, les outils de diagnostic deviendront davantage largement disponibles. Des concepts émergents seront créés pour répondre aux besoins du marché. Le développement de plateformes communes avec des composants jetables, tels que des puces de détection et des cartouches, qui peuvent être personnalisées pour de multiples tests et applications, dominera le domaine des biocapteurs dans un avenir proche.

III.2. AVANCEES RECENTES ET PERSPECTIVES D'AVENIR DANS L'UTILISATION DES BIOCAPTEURS A BASE D'APTAMERES DANS L'ANALYSE DE LA SECURITE ALIMENTAIRE (WANG *ET AL.*, 2022).

- Introduction

La sécurité alimentaire et la pollution de l'environnement sont les deux problèmes mondiaux les plus pressants qui menacent le développement humain. Il existe différents types de polluants alimentaires tels que les métaux lourds, les pesticides, les biotoxines qui sont largement utilisées en agriculture. Ces polluants sont devenus l'objectif de plusieurs recherches mondiales.

- Analyse

Les insecticides organophosphorés sont extrêmement toxiques par exemple le chlorpyrifos, ils peuvent pénétrer dans le corps humain par la chaîne alimentaire et avoir des effets défavorable sur la santé humaine, ils peuvent notamment endommager les reins, le foie, et les ovaires.

La détection des ions de métaux lourds, des biotoxines, des antibiotiques et des résidus des pesticides, représente une composante essentielle et requise de la sécurité alimentaire et du contrôle de la pollution. La technologie de détection a évolué dans le sens d'être simple et efficace, et une sensibilité et une précision élevée d'être rapide, rentable et pratique.

Les capteurs ont été utilisés dans une variété de domaines comme outils de détection ont sensibilités et rapides. (Tao *et al.* , 2020). Les capteurs fluorescents et électrochimiques ont une sensibilité élevée et un large éventail d'application (Khan *et al.*, 2019 ; Zhang et Fan, 2018).

Une nouvelle technologie de détection qui associe des capteurs à des aptamères (l'aptamère est un petit oligonucléotide qui peut se lier à des petites molécules et à une variété de cibles avec une affinité et une spécificité élevées (Mu *et al.*, 2021 ; Kirua Daniel *et al.*, 2019).

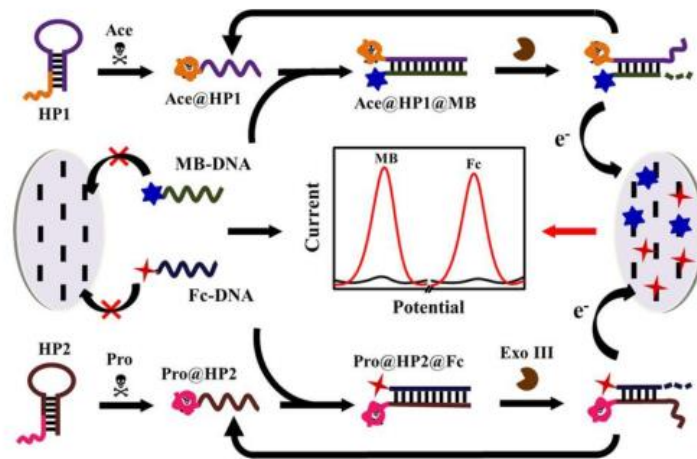


Figure 11 . Schéma du principe électrochimique pour la détection simultanée de deux pesticides. (Li, 2021).

Dans le travail de Chen (2020), un capteur de fluorescence à haute sensibilité a été développé pour la détection du malathion. Les chercheurs ont utilisé des nanofluorophores encapsulés dans un polymère cationique comme marqueurs pour la modification des aptamères, le capteur a une capacité de reconnaître sélectivement le malathion avec une limite de détection de 1,42 ng.

Mahantesh *et al.* (2020) ont conçu un capteur de fluorescence avec double mécanisme responsable de la détection sélective de Zn^{2+} dans 20% (eau, acétonitrile). Les résultats ont montré que le capteur de fluorescence peut augmenter l'intensité de fluorescence jusqu'à 17 fois de plus. De plus, il a répondu sélectivement aux ions Zn^{2+} par rapport aux autres ions métalliques testés.

Chapitre III : Synthèse des articles

L'étude des méthodes de détection des biotoxines (**Samokhvalov *et al.*, 2018**) présent dans certaines variétés de denrée alimentaire tel que les fruits sec et les céréales ont incité (**Xiong *et al.*, 2021**) a concevoir une nanomachine à double puce ADN capable de détecter l'ochratoxine A (OTA) et l'Aflatoxine B1 dans des échantillons alimentaires. L'Aptamère est lié à la substance cible puis la nanomachine est ouverte pour récupérer le signal de fluorescence. Cette stratégie a montré une grande précision et une grande sensibilité.

La détection des antibiotiques dans les aliments est nécessaires, en effet, afin de détecter la tétracycline (TC) dans le lait cru (**Ahmed *et al.*, 2021**) ont mis en place un capteur fluorescent à base d'aptamère pour détecter la TC. Ce dernier se compose de GQD et nanoparticules de palladium (NPS de Pb). Cette nouvelle stratégie de détection a fourni un moyen efficace de détection de la tétracycline avec une limite de détection de 45µg/mL.

- **Conclusion**

Pour réduire l'impact de plusieurs polluants, il est nécessaire d'étudier la méthode de détection simultanée de plusieurs polluants ; de simplifier le processus de prétraitement de l'échantillon et de réaliser la détection rapide de l'objet cible. Plusieurs études ont montré que la combinaison de biocapteurs d'aptamères est également une perspective de développement importante à l'avenir.

III.3. CONCEPTION DE CAPTEURS ET DE BIOCAPTEURS POUR LA DETECTION DES COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS (COV) (COVA *ET AL.*, 2022)

- Introduction

L'Agence de protection de l'environnement (EPA) et l'agence européenne pour l'environnement (AEE) définissent un composé organique volatil (COV) comme toute substance organique qui peut être vaporisée dans l'atmosphère dans des conditions normales

Diverses réglementations nationales et internationales ont proposé des définitions plus standardisées basées sur des critères prédéterminés, les COV peuvent provenir des diverses sources, notamment les matériaux de construction, les produits de soins personnels et les matières biologique comme les aliments.

- Analyse

Les méthodes classiques d'analyse des COV incluent la chromatographie (GC, LC, HPLC, etc.) qui peuvent être combinées avec d'autres techniques, telles que la spectroscopie de masse (MC), ces techniques sont certes très sensibles et efficaces, mais sont coûteuse et consommatrice du temps. Les biocapteurs COV ont rôle été utilisés avec succès dans un large éventail d'application, y compris l'analyse de la sécurité alimentaire (*Majhi et al., 2021 ; Tajik et al., 2021*). Les exigences des utilisateurs du secteur agroalimentaire (producteurs transformateurs distributeurs). Sont croissantes en matière de sécurité alimentaire. Tout au long de la chaîne alimentaire (production stockage, transport, il existe une grande variété de facteurs qui peuvent corrompre les produits alimentaires et réduire leur durée de conservation.

L'emballage alimentaire joue un rôle clé dans le maintien de la qualité des aliments ainsi que dans la préservation contre la contamination (*Shao et al., 2021*). La détection de COV spécifiques par exemple : 1-butanol ($C_4H_{10}O$), 2-éthyle-hexanol ($C_8H_{18}O$) sont des indicateurs de fraîcheur dans le produit alimentaire, tandis que d'autres COV tels que les acides gras volatils, sont produit lors de la détérioration des aliments (*Preis et al., 2013*).

En ce qui concerne la détection des COV dans l'industrie de la viande, les tendances les plus courantes ont été orientées vers la détection d'alcools ou d'acide acétique, en effet, des alcools tels que, le 3 méthyle-1-butanol ($C_5H_{12}O$) ou le 1-hexanol ($C_6H_{14}O$) indiquent une contamination par salmonella dans le bœuf emballé, tandis que l'acide acétique est un indicateur de la croissance de la population microbienne.

Les dernières avancées dans le développement de capteurs pour la détection d'alcools dans la viande conditionnée, concernant la détection de l'éthanol (C_2H_5O), (*Senapati et Sahu., 2020*).

Chapitre III : Synthèse des articles

ont produit une électrode patch AU AG-SNO₂/SIO₂/SI métal-isolant- semi-conducteur gaz capacitif. Une électrode à haute sensibilité (10PPM) pour les échantillons de viande de poulet.

La consommation de poisson ou de produit à base de poisson, est en plein essor en raison de leurs bienfaits pour la santé, ces produits sont extrêmement périssables, il est donc nécessaire de développer des techniques qui permettent de connaître plus en détail la fraîcheur des aliments. L'un des COV les plus caractéristiques émis lors de la détérioration du poisson est la triméthylamine (TMA, C₃H₉N) un produit chimique produit par la décomposition des protéines, des glucides, et des graisses.

Liu *et al.* (2020) ont incorporé des nanoparticules α - Fe₂O₃ dans les films épais, pour la détection de la TMA chez les poissons, ces capteurs ont montré une très bonne sélectivité et une haute sensibilité avec une détection minimale de 1 PPM.



Figure 12. Changement de couleur du capteur de papier colorimétrique imprimable lors du contrôle de la fraîcheur de la carpe herbivore en 24 h à 25 °C (**Sun, 2021**).

- Conclusion

Dans les développements futurs, ces problèmes pourront être résolus en exploitant les avancées les plus récentes dans les technologies liées aux différents composants des capteurs et biocapteurs. Par exemple, les derniers résultats en biotechnologie ouvrent la possibilité de concevoir des biocapteurs hautement sélectifs en ajustant l'affinité des récepteurs biologiques à des composés organiques volatils. De plus, l'intégration avec certain technologie (blockchain) peut fournir des informations aux producteurs, distributeurs et consommateurs sur l'origine, la production et traçabilité des produits alimentaires dans un seul appareil portable, peu coûteux et compact.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'assurance qualité et la sécurité des aliments sont les exigences essentielles de l'industrie alimentaire pour commercialiser les produits alimentaires selon les bonnes pratiques de fabrication.

Les biocapteurs s'avèrent être des outils favorables pour le dépistage des contaminants alimentaires tels que les résidus de pesticides et les agents pathogènes d'origine alimentaire et leurs toxines, en raison de leur sensibilité, de leur sélectivité, de leur simplicité, de leur fiabilité et de leurs applicabilités élevées. En outre, ils peuvent être utilisés pour des applications en ligne ou sur le terrain, les résultats peuvent être obtenus en très peu de temps, et les systèmes sont entièrement automatisés et donc moins laborieux.

Des facteurs tels que la stabilité, le stockage et la sensibilité des biocapteurs peuvent encore être améliorés. Par exemple, la stabilité du matériel biologique immobilisé peut être améliorée par l'utilisation d'enzymes thermophiles et de composants stabilisants. Cependant, à court terme, la recherche doit se focaliser sur l'utilisation de molécules biologiques et de transducteurs répandus pour permettre le développement d'applications concrètes au niveau industriel. C'est un véritable challenge technique pour ce domaine de l'industrie agroalimentaire qui est à la fois conservateur et très compétitif.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abou Saoud, W.** ; Assadi, A.A. ; Kane, A. ; Jung, A.V. ; Le Cann, P. ; Gerard, A. ; Bazantay, F. ; Bouzaza, A. ; Wolbert, D. Integrated process for the removal of indoor VOCs from food industry manufacturing: Elimination of Butane-2,3-dione and Heptan-2-one by cold plasma-photocatalysis combination. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2020, 386, 112071.
- Adrain, J.**, S. Pasche, and J.M. Diserens et al. 2009. Wave-guide interrogated Optical immunosensor (WIOS) for detection of sulphonamide antibiotics in milk. *Biosensors and Bioelectronics* 24 :3340–3346.
- Agueh, V. Et Degbey, C.** (2015) ISSN de la revue :1991-8631. *Journal Home –Archives-* Vol,9(1)
- Ahmed, M.U.**, M.M. Hossain, and E. Tamiya. 2008. Electrochemical biosensors for medical and food applications. *Electroanalysis* 20 :616–626
- Ahmed, S. Kumar,** G.A. Ortega, S. Srinivasan and A.R. Rajabzadeh, *Food Chemistry*, 346 (2021) 128893. Article 03
- Amine, Ayad Mohamed.** Effet de la supplémentation des rations de poulinières par *saccharomyces cerevisiae* sur la concentration des IgG1 colostrales, l'immunité passive, les paramètres biochimiques et de reproduction dans la région de Tiaret. Diss. 2018.
- Ben Aissa, S.** (2020), Elaboration de plateformes nanométriques pour la détection dans le demain agroalimentaire et environnemental (Doctoral dissertation, perpignan)
- Ben Ali, Wissal.** Criblage de la diversité fongique marine visant à identifier de nouvelles oxydases pour les biotechnologies et le développement durable. Diss. Aix-Marseille, 2021.
- Bizet, K.**, Gabrieli, C., Perrot, H. And Thérasse, J., La microbalance à quartz électrochimique : perspectives d'application en biologie médicale. *Immunoanal Biol Spéc* 1995. 10 : 205- 211.
- Blake, R. M.** Jones, R. C. Blake, Antibody -based sensors for heavy metal ions, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol 16, P (799-809), 2001.
- Blanchette, V.** (2014). *Exploration de l'utilisation de la cellulose conjuguée aux peptides antimicrobiens dans l'optique de fabriquer un matériel biomédical pour le secteur podiatrique* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- Boeckel, Thomas P.** van, Joseph D. Hounhouigan, and Robert Nout. Les aliments : transformation, conservation et qualité. Technical Centre for Agricultural and Rural Coopération, 2003.
- Boisse, Thanh Thuy Nguyen.** Micro biocapteurs conductimétriques utilisant des oxydoréductases : de la conception à l'application à l'environnement et l'agroalimentaire. Diss. Université Claude Bernard-Lyon I, 2013.
- Boubezari, Imane.** Conception et développement de nouveaux capteurs chimiques et de (bio) capteurs à transduction électrochimique. Diss. Université de Lyon ; Université de Jijel, 2021.

Références bibliographiques

Boudjerda, Chahira, et al. *Application biotechnologie des cellules microbiennes immobilisées.* Diss. Université de Jijel, 2008. 1.

Bourjilat, A (2017), Etude et conception d'une plateforme micro fluidique pour la détection de séquence ADN par spectroscopie d'impédance (Doctoral dissertation, Université de Lorraine)

C. Luo, H. Tang, W. Cheng, L. Yan, D. Zhang, H. Ju, and S. Ding, "A sensitive electrochemical DNA biosensor for specific detection of Enterobacteriaceae bacteria by ExonucleaseIII-assisted signal amplification," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 48, pp. 132–137, 2013.

Cao, L., H. Lin, and V.M. Mirsky. 2007. Surface plasmon resonance biosensor for enrofloxacin based in deoxyribonucleic acid. *Analytica Chimica Acta* 589 :1–5.

Caparros Megido, Rudy, et al. "Risques et valorisation des insectes dans l'alimentation humaine et animale." *Annales de la Société entomologique de France (NS)*. Vol. 51. No. 3. Taylor & Francis, 2015.

Casadio, J.W. Lowdon, K. Betlem, J.T. Ueta, C.W. Foster, T.J. Cleij, B.van Grinsven, O.B. Sutcliffe, C.E. Banks, M. Peeters, Development of a novel flexible polymerbased biosensor platform for the thermal detection of noradrenaline in aqueous solutions, *Chem. Eng. J.* 315 (2017) 459–468

Chen, R. Sheng, P.Y. Wang, Q. Ouyang, A.C. Wang, S. Ali, M. Zareef, M. M. Hassan, *Spectrochimica Acta Part A : Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 241 (2020) 118654

Choi, C. A, Mazrad, Z.A. L ; Lee, G ; In, L, Lee, K. D ; Park, S.Y ;2018Boronate-based fluorescent carbon dot for rapid and sélective bacterial sensing by luminescence off/on system.*J.pharm. BIOMED.Anal.*159,1-10

Clark, C. Lyons, Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery, *Ann.N.Y. Acad.Sci.*102(1962)29-45.

Dahchar, développement d'électrodes modifier à base de films minceselectroactifs. Application a la détection electrocatalitique, Thèse de doctorat, Université Annaba, 2017.

Dahouenon-Ahoussi, Edwige, et al. "Stabilisation de la bière produite à partir de matières amylacées locales (*Sorghum bicolor* et *Musa acuminata*) par adjonction de l'huile essentielle de *Cymbopogon citratus*." *Journal of Applied Biosciences* 51 (2012): 3596-3607.

Damborsky, Svitel et Katrik, Optical biosensors, *Essays Biochem* ;60(1),2016, pp91-100

Dandach, Amar. Transformation de la cellulose en bioproduits : une approche intégrée couplant la catalyse enzymatique et la catalyse hétérogène. Diss. Université de Lyon ; École Doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth), 2018.

Dattée, Y., & Pelletier, G. (2014). *Pourrons-nous vivre sans OGM : 60 clés pour comprendre les biotechnologies végétales.* Editions Quae.

Références bibliographiques

Dridi, Fatma. Développement d'un nouveau biocapteur enzymatique ultrasensible pour la détection conductimétrique de l'ochratoxine A dans l'huile d'olive. Diss. Université de Lyon, 2016.

Duarte, C ;Costa, T ;carneiro,C ;Soares ;Jitariu,A ;cardoso,S ;et al ;2016.semi-quantitative method for streptococci magnetic detection in raw milk.biosensors 6,1-14

Dubois-Brissonnet, F., & Guillier, L. (2020). Les maladies microbiennes d'origine alimentaire. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 55(1), 30-38.

Eggins, C. Hickey, S. A. Tof t, D. M. Zhou, Determination of flavanols in beers with tissue biosensors. Analytica Chimica Acta 347, P (281-288), 1997

El Alami, Amal. Mise en œuvre de biocapteurs en vue de la détection de pesticides dans l'eau par diffusion Raman exaltée. Diss. Le Mans, 2017.

El Hassani, N, E, A (2018) Conception et réalisation de Capteurs et de Biocapteurs Electrochimiques à Base de Nanomatériaux pour le Contrôle de la Qualité en Agroalimentaire et pour l'Analyse Biomédical (Doctoral dissertation, Université de Lyon ; Université Moulay Ismail (Meknès, Maroc), Faculté des sciences)

Fan and G.Y. Shi, Analytica Chimica Acta, 1105 (2021) 238177

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides (Revised version). Rome, 2002.
http://www.fao.org/fleadmin/templates/agphomel/documents/Pests_Pesticides/code/code.pdf (accessed September 20, 2010)

Gaudin, Valérie. Caractérisation de la performance et validation des méthodes de dépistage des résidus d'antibiotiques dans les denrées alimentaires. Diss. Université Rennes 1, 2016.

Goers, C. Ainsworth, C.H. Goey, C. Kontoravdi, P.S. Freemont, K.M. Polizzi, Whole-cell *Escherichia coli* lactate biosensor for monitoring mammalian cell cultures During biopharmaceutical production, Biotechnol. Bioeng. 114 (2017) 1290–1300.

Goral, N. V. Zaytseva, and A. J. Baeumner, “Electrochemical microfluidic biosensor For the detection of nucleic acid sequences,” Lab on a Chip, vol. 6, pp. 414–421, 2006.

Guedri, H. (2010). Mise au point de biocapteurs basés sur la mesure d'activités Enzymatiques de cellules algales pour la surveillance des milieux aquatiques. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Guilbault J.G. Montalvo, A urea-specific enzyme electrode, J.Am. Chem.Soc.91(1969)2164-2165.

Guilbault, J.G. Montalvo, An improved urea specific enzyme electrode, Anal.Lett.2(1969)283-293

H.J. Qi, H.Y. Li and F. Li, Analytical Chemistry, 01 (2021) 93.

Références bibliographiques

Hafaid, "Etude physicochimique de capteurs base de nanomatériaux pour des applications Biomédicales", Thèse de doctorat, Université INSA de Lyon, 2009

Hafaid, « Etude physicochimique de capteurs base de nanomatériaux pour des applications biomédicales », Thèse de doctorat, Université INSA de Lyon, 2009 .

Heineman, W.B. Jensen, Obituary L. Clark. (19182005), Biosens.Bioelectron.8(2006)1403-1404.

Huang, S.H. 2006. Gold nanoparticle-based immunochromatographic test for identification of *Staphylococcus aureus* from clinical specimens. *Clinica Chimica Acta* 373 :139–143.

Huang, S.H., H.C. Wei, and Y.C. Lee. 2007. One-step immunochromatographic assay for the detection of *Staphylococcus aureus*. *Food Control* 18 :893–897

Huang, Y.K. Han, Y.K. Gao, J.W. Gao, H. Ji, Q.H. He, J.B. Tu, G.Q. Xu, Y. Zhang and L. Han, *Electrochimica Acta*, 373 (2021) 137921

Jarrar, Thèse de doctorat, Bioélectrodes enzymatiques pour des applications en biocapteurs et en biopiles, Ecole nationale supérieure de chimie de Montpellier, 2011.

Kahlouche, **Karima**. Microsystème pour la nanomédecine : application aux maladies nosocomiales et à la détection des agents pathogènes. Diss. Bourgogne Franche-Comté, 2018.

Kengne-momo, Rosine pélagie, mise en oeuvre des surfaces spécifiques en vue de la détection de bactéries pathogènes par diffusion raman, diss, le mans, 2011.

Kiruba Daniel, A. Kumar, K. Sivasakthi and C.S. Thakur, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 290 (2019) 73-78

Koncki, Recent development in potentiometric biosensors for biomedical analysis, *Anal.Chim ; Acta ;599(1)2007*, pp7-15

Kotsiri, **Z** ; Vantarakis, A ; Rizzotto, F ; kavanaugh, D ; Ramarao, N ; vidic, J ;2019, sensitive detection of *E. Coli* in artificial seawater bay aptamer –coated magnetic beads and direct PCR.APPL. Sei.9

L. Goers, C. Ainsworth, C.H. Goey, C. Kontoravdi, P.S. Freemont, K.M. Polizzi, Whole-cell *Escherichia coli* lactate biosensor for monitoring mammalian cell cultures during biopharmaceutical production, *Biotechnol. Bioeng.* 114 (2017) 1290–1300.

Lahmani, **P.** Boisseau, P. Houdy, *Les nanosciences : Nano biotechnologies et nanobiologies*, Edition Belin, Paris, 2007.

Leland Clark, Monitor and control of blood and tissue oxygen tensions, *Trans –Am. Soc. Artif.Intern. Organs.*2(1956)41.

Références bibliographiques

Leroy, Christopher. L'électroencéphalographie : un bio-marqueur pour le développement clinique de nouveaux traitements pharmacologiques de la maladie d'Alzheimer. Diss. Université du Droit et de la Santé-Lille II, 2016.

Lillehoj, P., Kaplan, C., He, J., Shi, W., Ho, C.M. 2014. Rapid electrical impedance detection of bacterial pathogens using immobilized antimicrobial peptides. *J. Lab. Autom.* 19, 42-49

Liu, F ; Nordine, A.N ; Li, F ; Voiculescu, I ; 2014. A lab-on-chip cell-based biosensor for label-free sensing of water toxicants lab chip 14, 1270-1280

Luan, Y., Wang, N., Li, C., Guo, X., & Lu, A. (2020). Advances in the application of aptamer biosensors to the detection of aminoglycoside antibiotics. *Antibiotics*, 9(11), 787.

Luo, Y. Han, X.M. Chen, W.Z. Tang, T.L. Yue and Z.H. Li, *Trends in Food Science and Technology*, 95 (2020) 149-161.

M. Delvaux, S. Demoustier-Champagne, Immobilisation of glucose oxidase within metallic nanotubes arrays for application to enzyme biosensors, *Biosensors and Bioelectronics* 18, P (943-951),

Mahantesh, N. Ganesh, P., Shivaraj, P. Kadolkar, K. Gudasi and S. Inamdar, *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 390 (2020) 112298

Majhi, S.M. ; Mirzaei, A. ; Kim, H.W. ; Kim, S.S. ; Kim, T.W. Recent advances in energy-saving chemiresistive gas sensors : A review. *Nano Energy* 2021, 79, 105369.

Manzano, M ; Viezzis ; Mazerat, S ; Marks, R, S ; Vidic, J ;2018. Rapid and label-free electrochemical DNA biosensor for detecting hépatites, *Avirus, biosens ; bioelectron* 100 ,89-95

Mosbach, B. Danielsson, An enzyme thermistor, *Biochim. Biophys. Acta BBA -Enzymol.* 364 (1974) 140–145.

Multari, C ; palego, Ma, X, Du, X ; Ning, Y ; et al ;2018 Differentiation of live and heat-killed *E. coli* by micro wave impedance spectroscopy, *sensory actuators B* :255,1614-1622

Muresan, L., R.R. Valera, I. Frebort, I.C. Popescu, E. Csoregi, and M. Nistor. 2008. Amine oxidase amperometric biosensor coupled to liquid chromatography for biogenic amines determination. *Microchimica Acta* 163 :219–225.

Nadjet, Touaitia Et Sawsen, Harkat. *Utilisation de quelques plantes aromatiques dans la conservation des viandes.* 2021. Thèse de doctorat. Université Laarbi Tebessi Tbesa.

Pohanka, M. and P. Skládal, Electrochemical biosensors - Principles and applications. *Journal of Applied Biomedicine*, 2008. 6(2) : p. 57-64.

Preis, S. ; Klauson, D. ; Gregor, A. Potential of electric discharge plasma methods in abatement of volatile organic compounds originating from the food industry. *J. Environ. Manag* 2013, 114, 125–138.

Références bibliographiques

R. Khan, T.A. Sherazi, G. Catanante, S. Rasheed, J.L. Marty and A. Hayat, Food Chemistry, 312 (2019) 126048

Ramanathan, K. And B. Danielsson, Principles and applications of thermal biosensors. Biosensors and Bioelectronics, 2001. 16(6) : p. 417-423

Rejeb, I.B., F. Arduinib, A. Arvinted, et al. 2009. Development of a bio-electrochemical assay for AFB1 detection in olive oil. *Biosensors and Bioelectronics* 24 :1962–1968

Reshetilov, O.N. Ponamoreva, V.A. Arlyapov, V.A. Alferov, T.V. Rogova, I.V. Blokhin, I.F. Chepkova, Microbial biosensors to express determine bod ineffluents from Food industry enterprises, Water : Chemistry and ecology. 3 (2008) 23–30

Ron kainen, H. Brian Halsall, W.R. Heineman, Electrochemical boiseuses, chem. Soc. Rev. 39 (2010) 1747-1769

Ronkainen, Halsall et Heineman, Electrochemical biosensors Chem.soc.Rev ;39(5),2010, p.1747

Samokhvalov, I.V. Safenkova, S.A. Eremin, A.V. Zherdev and B.B. Dzantiev, Analytical Chemistry, 90 (2018) 9189-9198

Sanchez-Moreno, C., J. A. Larrauri, and F. Saura-Calixto. 1999. Free radical scavenging capacity and inhibition of lipid oxidation of wines, grape juices and related polyphenolic constituents. *Food Research International* 32:407–412.

Santi and R. H. Guy, “Reverse iontophoresis — parameters determining electroosmotic flow. II. Electrode chamber formulation,” Journal of Controlled Release, vol. 42, no. 1, pp. 29–36, oct 1996. [Online]. Available : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/Pii/0168365996013454>

Senapati, M. ; Sahu, P.P. Meat quality assessment using Au patch electrode Ag-SnO₂/SiO₂/Si MIS capacitive gas sensor at room Temperature. Food Chem. 2020, 324, 126893. [CrossRef]

Shao, P. ; Liu, L.M. ; Yu, J.H. ; Lin, Y. ; Gao, H.Y. ; Chen, H.J. ; Sun, P.L. An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring. Trends Food Sci. Technol. 2021, 118, 285–296.

Shehata, M.M. 2005. Genetically modified organisms (GMOs) food and feed : Current status and detection. *International Journal of Food, Agriculture and Environment* 3 :43–55.

Sine, Hasnaa. Etude du biomarqueur cholinesterase serique, chez les personnes exposees professionnellement aux pesticides au niveau de la region souss mas. Diss. 2022.

Sinibaldi, A. Anopchenko, R. Rizzo, N. Danz, P. Munzert, P. Rivolo, F. Frascella, S. Ricciardi, F. Michelotti, Angularly resolved ellipsometric Optical biosensing by means Of Bloch surface waves, Anal. Bioanal. Chem. 407 (2015) 3965–3974.

Références bibliographiques

Spasic, F. Delpont, T. Van Stappen, I. Detrez, D. Daems, S. Vermeire, A. Gils,-Lammertyn, Immunoassay for detection of infliximab in whole blood using afiber-opticsurface plasmon resonance biosensor, *Anal. Chem.* 89 (2017) 3664–3671.

Storri, T. Santoni, M. Minunni, M. Mascini, Surface modifications for the development of piezoimmunosensors, *Biosensors and Bioelectronics*, P (347-357), 1998.

Sun, Y. ; Wen, J.W. ; Chen, Z.J. ; Qiu, S.B. ; Wang, Y.X. ; Yin, E.Q. ; Li, H.B. ; Liu, X.H. Non-destructive and rapid method for monitoring fish freshness of grass carp based on printable colorimetric paper sensor in modified atmosphere packaging. *Food Anal. Methods* 2021, 1–1a1. [CrossRef]

Suzuki, F. Takahashi, I. Satoh, N. Sonobe ,Ethanol and lactie acide Sensors using électrodes coated with dehydrogenase _collagen membranes,*Bull.Chem.Soc.Jpn.*48(1975)3246-3249.

Tajik, S. ; Beitollahi, H. ; Nejad, F.G. ; Dourandish, Z. ; Khalilzadeh, M.A. ; Jang, H.W. ; Venditti, R.A. ; Varma, R.S. ; Shokouhimehr, M. Recent developments in polymer nanocomposite-based electrochemical sensors for detecting environmental pollutants. *Ind. Eng.Chem. Res.* 2021, 60, 1112–1136.

Tao, Z.Y. Liao, Y.Q. Zhang, F. Fu, M.Q. Hao, Y. Song and E. Song, *Chinese Chemical Letters*, (2020)

Thévenot, D.R., et al., Electrochemical biosensors : recommended definitions and Classification. *Biosensors and Bioelectronics*, 2001. 16(1–2) : p. 121-131.

Thévenot, K. Toth, R.A. Durst, G.S. Wilson, Electrochemical biosensors : recommended definitions and classification, *Biosens. Bioelectron.* 16 (2001) 121 131.

Thien Hoang , (2019). Université de Tours France. Dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique : modélisation, fabrication et caractérisation

Tlili, C. (2006). Etude et réalisation de biocapteurs impédancemétriques en utilisant différentes approches d'immobilisation. Thèse de doctorat, Université paris 11

Trilling, J. Beekwilder, H. Zuilhof, Antibody orientation on biosensor surfaces : a Minireview, *Analyst.* 138 (2013) 1619–1627.

Tryland, I., and L. Fiksdal. 1998. Enzyme characteristics of beta-D-galactosidase- and beta-D-glucuronidase-positive bacteria and their interference in rapid methods for detection of waterborne coliforms and *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology* 64 :1018–1023

Vanderriest, M. ; Ragaert, P. ; Devlieghere, F. ; De Meulenaer, B. Intelligent food packaging: The next generation. *Trends Food Sci.Technol.* 2014, 39, 47–62.

Vidic, J Vizzini, P, Manzano, M, Kavanaugh, D, Ramarao, N, Zivkovic, M, et al 2019 Point-of-Need DNA testing for detection of foodborne pathogenic bacteria *Sensors* 19 (5) 1100

Références bibliographiques

Vidic, J., Manzano, M Change, CM Jaffrezic-Renaut, N 2017 Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry, *Vet Res* 48 ,1-22

VOC. Available online : <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality/resources/glossary/voc> (accessed on 15 December 2021).

Vo-Dinh, T. And B. Cullum, Biosensors and biochips : advances in biological and medical diagnostics. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2000. 366(6-7): p. 540-551.

Voet, Donald, and Judith G. Voet. *Biochimie. De Boeck Supérieur*, 2016.

Wang, J. (2001). Glucose biosensors : 40 years of advances and challenges. *Electroanalysis*, 13(12), 983. (Definition 2)

Wang, Y.C. Xu, N. Cheng, Y.X. Xie, K.L. Huang and W.T. Xu, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 321 (2020) 128598

What Are Volatile Organic Compounds (VOCs) Available online : <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs> (accessed on 1 December 2021)

Wise, L. B. Wingard, *Biosensors with fiber optics*, Humana Press, New Jersey, 1991

Xiong, Q. Wang, Y.J. Xie, N. Ling, W. Yun and L.Z. Yang, *Food Chemistry*, 338 (2021) 338:128122

Yang, H., H. Li, and X. Jiang. 2008. Detection of foodborne pathogens using bioconjugated nanomaterials. *Microfluidics and Nanofluidics* 5 :571–583.

Zajoncova, L., M. Jilek, V. Beranova, and P. Pec. 2004. A biosensor for the determination of amylase activity. *Biosensors and Bioelectronics* 20 :240–245

Zamoum, M. R. (2019). Évaluation des teneurs d'antibiotiques dans la chair de poulet de la région centre : Contribution au Projet Algérien de Surveillance des Résidus et Contaminants dans l'Aliment « PASCRA ».

Zhang and Z.F. Fan, *Microchimica Acta*, 185 (2018) 3

Zura, D. Babié, MD. Steinberg, I Murković Steinberg, Low-cost conductometric transducers for use in thin polymer film chemical sensors, *Sens. Actuators B Chem.* 193 (2014) 128–135

RÉSUMÉS

Résumé

L'industrie agroalimentaire a besoin de techniques analytiques pour le contrôle des procédés de transformation, la vérification de la composition des matières premières et la confirmation de la qualité des produits finis et semi-finis. Les techniques adoptées doivent être rapides, spécifiques et moins coûteuses. Le but de ce travail est de faire une étude bibliographique réunissant des informations autour des biocapteurs. Ces derniers permettent la détection et/ou la quantification de sucres, d'acides, d'alcools, des édulcorants et des acides aminés dans les aliments. Egalement, de nouvelles applications portant sur les contaminants des aliments (toxines, pesticides, résidus médicamenteux, microorganismes pathogènes, etc) ont été développées. Le développement de biocapteurs portables permettant, par exemple, la détection rapide de pathogènes dans les aliments représente un enjeu réel pour les producteurs, transformateurs, distributeurs et les agences de régulation. Toutefois, des efforts considérables à la technologie des biocapteurs restent à faire pour permettre le développement d'applications concrètes au niveau industriel.

Mots clés : Contrôle, biocapteurs, qualité, l'agroalimentaire.

Abstract

The food industry needs analytical techniques for process control, verification of raw material composition and confirmation of the quality of finished and semi-finished products. The techniques adopted must be fast, specific and less expensive. The aim of this work is to carry out a bibliographical study gathering information about biosensors. These allow the detection and/or quantification of sugars, acids, alcohols, sweeteners and amino acids in foods. Also, new applications concerning food contaminants (toxins, pesticides, drug residues, pathogenic microorganisms, etc.) have been developed. The development of portable biosensors allowing, for example, the rapid detection of pathogens in food is a real challenge for producers, processors, distributors and regulatory agencies. However, considerable efforts in biosensor technology are still required to enable the development of concrete applications at the industrial level.

Key words: Control, biosensors, quality, food industry.

الملخص

تحتاج صناعة الأغذية إلى تقنيات تحليلية للتحكم في عمليات التحويل ، والتحقق من تكوين المواد الخام وتأكيد جودة المنتجات النهائية ونصف المصنعة. يجب أن تكون التقنيات المعتمدة سريعة ومحددة وأقل تكلفة. الغرض من هذا العمل هو إجراء دراسة ببيوغرافية تجمع المعلومات حول المستشعرات الحيوية. هذه تسمح باكتشاف و / أو قياس السكريات والأحماض والكحول والمحليات والأحماض الأمينية في الأطعمة. كما تم تطوير تطبيقات جديدة تتعلق بالملوثات الغذائية (السموم ، ومبيدات الآفات ، ومخلفات الأدوية ، والكائنات الدقيقة المسببة للأمراض ، وما إلى ذلك). إن تطوير أجهزة الاستشعار الحيوية المحمولة التي تسمح ، على سبيل المثال ، بالكشف السريع عن مسببات الأمراض في الغذاء يمثل تحديًا حقيقيًا للمنتجين والمعالجات والموزعين والوكالات التنظيمية. ومع ذلك ، لا يزال يتعين بذل جهود كبيرة في مجال تكنولوجيا المستشعرات الحيوية للسماح بتطوير تطبيقات ملموسة على المستوى الصناعي.

الكلمات المفتاحية : المراقبة , أجهزة الاستشعار الحيوية ، الجودة ، صناعة المواد الغذائية.