

Introduction

L'environnement, la santé et le secteur agro-alimentaire sont des domaines qui, de nos jours, sont soumis à des normes réglementaires très strictes, qui impliquent de plus en plus de contrôles et de vérifications, et pour lesquels un très grand nombre de systèmes de détection et d'analyse (capteurs) ont été imaginés. Un capteur est ainsi un dispositif qui permet soit de mesurer, si possible en continu, une grandeur physique (température, pression, intensité lumineuse, position d'un objet, accélération, etc.), soit de détecter et d'évaluer avec précision la concentration d'un composé chimique ou biologique présent dans un milieu environnant.

Bien avant l'avènement des nanotechnologies, la conception de capteurs chimiques en tous genres a constitué un domaine de prédilection de la chimie analytique. Le fonctionnement d'un capteur chimique ou biochimique implique une relation de cause à effet entre trois entités : le composé à analyser (*analyte*)¹, le récepteur et un dispositif de transduction qui transforme l'interaction entre l'analyte et le récepteur en un signal physique mesurable, qui, suivant les cas, peut être de nature électrique, électrochimique, optique, thermique ou gravimétrique (figure 1).

Parmi les plus anciens systèmes commercialisés, c'est probablement celui relatif à la détection électrochimique du glucose dans le sang de l'organisme humain, proposé initialement par Clark et Lyons dès 1962 (Clark et Lyons 1962), qui a suscité le plus grand nombre de travaux et obtenu les progrès technologiques les plus significatifs. C'est ainsi que par la suite ont émergé différents systèmes de détection enzymatiques ou non, à base de nanomatériaux, miniaturisés et conçus en systèmes portables, permettant de réaliser avec précision des dosages en continu du glucose dans le sang (Wang 2008), avec une approche semi-invasive (par exemple par l'insertion d'un aiguillon transcutané) ou par des méthodes nouvelles vers des systèmes non invasifs (Chen 2017).

1. On désigne par analyte l'entité chimique que l'on souhaite identifier et/ou quantifier.

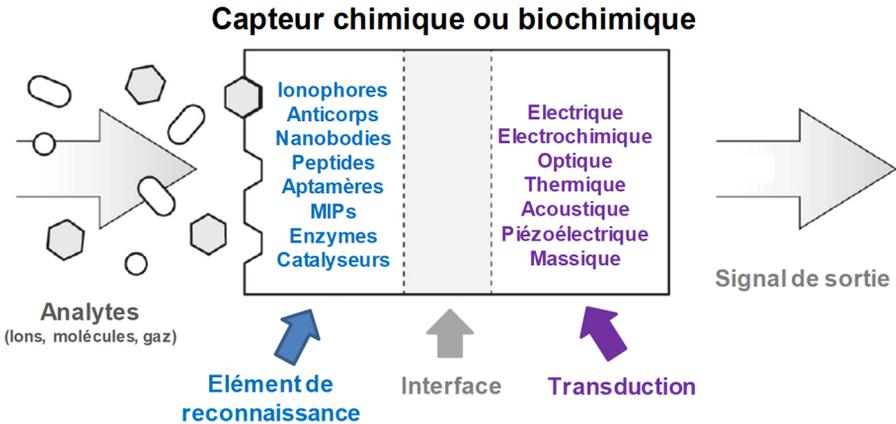


Figure 1. Schéma adapté de Chambers et al. (2008)

Au cours de ces dernières décennies, de nombreux capteurs chimiques et biologiques de plus en plus performants ont été fabriqués, comportant notamment des récepteurs constitués de nanomatériaux carbonés (nanotubes de carbone ou CNT, graphène, nanodots de carbone) ainsi que des nanomatériaux inorganiques (nanoparticules métalliques de formes variées, nanocristaux, nanofils, boîtes quantiques semiconductrices ou *quantum dots*).

Les avantages apportés par ces nanomatériaux sont multiples, tout particulièrement lorsqu'ils interviennent dans la conception de systèmes pour lesquels la transduction est d'origine électrique ou optique. Dans le cas du graphène et des CNT, leur très grande conductivité ainsi que leurs mobilités de charges très élevées, susceptibles de variations importantes dès que de faibles modifications de surface se produisent, en font des récepteurs d'une extrême sensibilité. Par ailleurs, les surfaces spécifiques très élevées de ces matériaux ($\sim 2\,600\text{ m}^2/\text{g}$ pour le graphène) font que, sous forme d'une monocouche atomique, ils sont capables d'adsorber des quantités importantes du composé à doser, et donc de produire un signal de transduction de forte intensité, bien meilleur que celui obtenu avec d'autres matériaux carbonés de dimensions microniques.

Parallèlement à ces recherches, des efforts importants ont été consacrés à la « portabilité » de capteurs de très grande sensibilité dotés de systèmes de transduction variés, avec notamment un effet d'amplification du signal reposant sur l'élaboration du capteur sous la forme d'un transistor à effet de champ (FET). L'ultime perspective de conception de ces capteurs est un fonctionnement en totale autonomie, fondé sur la capture et

la transformation de l'énergie environnante en énergie électrique (*Self Charging Power Systems*) (Kausar *et al.* 2014 ; Pu *et al.* 2018a).

Plan de l'ouvrage

Notre objectif est d'analyser les différents problèmes rencontrés dans la conception d'un capteur et de montrer quelles sont les méthodes utilisées pour d'une part séparer les analytes d'un mélange et, d'autre part, choisir une méthode physique permettant de délivrer un signal de transduction intense conduisant à une détection sélective. L'ouvrage comporte ainsi deux parties : la première est une description des nanomatériaux et des méthodes physiques de reconnaissance et de séparation les plus utilisées dans la confection des capteurs ; la seconde est plus appliquée et donne une description des différents capteurs utilisés dans les domaines de l'environnement et du biomédical.

Partie 1. Nanomatériaux, amplification, séparation, reconnaissance et transduction

Le chapitre 1 décrit les propriétés de quelques nanomatériaux organiques et inorganiques parmi les plus importants. Nous y soulignons l'apport majeur de nouveaux nanomatériaux carbonés tels que les CNT, le graphène, les *carbon nanodots*, les polymères conducteurs en couches minces, mais également celui de nanomatériaux inorganiques élaborés sous des formes variées (nanofils, nanotubes, nanofeuillets) qui ont permis de réaliser d'énormes progrès dans la conception des systèmes de détection et d'analyse portables (Kim *et al.* 2019).

Le chapitre 2 est consacré aux méthodes de séparation de composés constitutifs d'un mélange et concerne les différentes techniques de chromatographie et d'électrophorèse. Par ailleurs, les techniques d'amplification spécifiques à l'ADN, nécessaires à son identification et son séquençage, et qui ne sont accessibles le plus souvent qu'à l'état de traces infinitésimales, font l'objet d'une brève description.

Le chapitre 3 développe les principaux systèmes de reconnaissance entre analyte et récepteur, impliquant généralement des couples de molécules susceptibles de s'auto-assembler, présentant l'une pour l'autre une très grande affinité, telle que celle observée avec la paire de protéines avidine-biotine, anticorps-antigène, ainsi que les associations entre brins d'ADN complémentaires.

Le chapitre 4 décrit les caractéristiques des méthodes physiques principales utilisées pour produire un signal de transduction, fondées essentiellement sur l'utilisation de dispositifs électroniques, électrochimiques, piézoélectriques ou optoélectroniques, illustrées par quelques exemples.

Partie 2. Capteurs pour l'environnement et la biologie

Le chapitre 5 est consacré aux capteurs chimiques appliqués aux problèmes environnementaux. Il concerne principalement l'analyse des sels minéraux et des gaz, en rapport avec les problèmes de toxicologie. C'est un domaine qui a connu des développements importants avec les électrodes à membranes et à ionophores, sélectives aux ions (ISE, *Ion Selective Electrodes*), adaptées par la suite à la réalisation de dispositifs portables tout solide avec, dans ce dernier cas, une forte implication des nanomatériaux. La même évolution s'est produite pour l'analyse des gaz, appliquée essentiellement à quelques gaz toxiques.

Le chapitre 6 est focalisé essentiellement sur les problèmes d'analyse biomédicale. Des solutions innovantes sont proposées où l'apport des nanomatériaux (Lin *et al.* 2018) y est déterminant. Le contrôle en temps réel des principales molécules secrétées par l'organisme constitue un objectif majeur que nous décrivons dans le cas particulier du glucose, de l'urée et du cholestérol, principales molécules responsables de maladies chroniques. Les biomarqueurs de certaines maladies (cancers, maladies cardiaques, etc.), les agents pathogènes de l'alimentation de même que les virus et bactéries, sont également des domaines traités pour lesquels les dispositifs d'analyse portables s'avèrent déterminants pour une prévention efficace.