

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE
L'UNIVERS
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



5/10 2010

NAHAL / GUY

Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

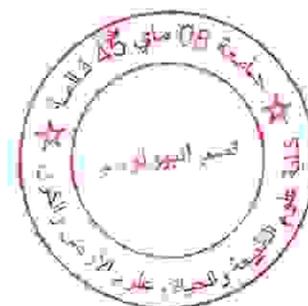
Spécialité/Option : Qualité des produits et sécurité alimentaires

Thème :

Modélisation des Analyses Alimentaires

Présenté par : GOUILLA Hassan

NAHAL Mustapha



Devant le jury composé de :

Président : Mr. DJEKOUN Mohamed (M.C.B.)
Examinatrice : M^{me}. SOUIKI Linda (M.C.A.)
Examinatrice : M^{lle}. DERBAL Nora (M.A.B.)
Encadreur : Mr. BENABDALLAH Ahcene Youcef (M.A.B.)

Juin 2012

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE
L'UNIVERS
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

Spécialité/Option : Qualité des produits et sécurité alimentaires

Thème :

Modélisation des Analyses Alimentaires

Présenté par : GOUILLA Hassan

NAHAL Mustapha

Devant le jury composé de :

Président : Mr. DJEKOUN Mohamed (M.C.B.)
Examinatrice : M^{me}. SOUIKI Linda (M.C.A.)
Examinatrice : M^{elle}. DERBAL Nora (M.A.B.)
Encadreur : Mr. BENABDALLAH Ahcene Youcef (M.A.B.)

Juin 2012

Produced with ScanTOPDF

Remerciment

Produced with ScanTOPDF

Remerciement

Tout d'abord nous tenons à exprimer nos gratitude à « DIEU » tout puissant qui nous a donné le courage et la force de mener à bien ce modeste travail

J'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur DJEKOUN Mohamed, Maître de conférence B, au Département de Biologie, Université 08 MAI 1945 Guelma, pour avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Mes sincères remerciements sont adressés à Madame SOUIKI Linda, Maître de conférence A, au Département de Biologie, université 08 MAI 1945, qui ma fait l'honneur de s'intéresser pour m'avoir honoré en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Nous exprimons notre gratitude à M^{elle} DERBAL Nora maître assistant B au département de biologie, Université de 08 Mai 1945, pour bien vouloir examiner ce travail

Nos vifs remerciements s'adressent à notre encadreur monsieur Ben ABDALLAH Ahcene Youcef,

Sans oublier Monsieur HERIDI Ahcene membre de laboratoire d'analyse Bio-geochimique et écologique des environnements aquatiques

Enfin nous tenons à remercier tout les personnels du département de biologie de l'université 08 Mai 1945 Guelma.

Liste des Abréviations

Produced with ScanTOPDF

Liste des abréviations

COV	Composés Organiques Volatiles
NO	Neurone Olfactif
GPCR	G Protein-coppled receptor
ATP	Adénosine Triphosphate
AMPc	Adénosine Mono Phosphate Cyclique
ISFET	Ion-sensitive field-effect transistor
RNA	Réseau de Neurone Artificiel
r	Coefficient de corrélation
r²	Coefficient de détermination
C	Conductivité
t	Température
\bar{t}	La moyenne de la température
\bar{C}	La moyenne de la conductivité
\overline{pH}	La moyenne du pH
NaOH	Hydroxyde de sodium
KOH	Hydroxyde de potassium
HCl	Chlorure d'hydrogène
AA	Acide Acétiques

Table des matières

Produced with ScanTOPDF

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : La qualité des aliments et la perception humaine

1. La qualité des aliments..... 3

 1.1. La qualité hygiénique..... 3

 1.2. La qualité marchande..... 3

2. Incidences de la contamination sur la qualité marchande..... 4

 2.1. Relations microorganisme / composition de l'aliment..... 4

 2.2. Modifications de l'odeur..... 4

 2.3. Modifications du goût..... 6

3. Les capteurs biologiques humains..... 6

 3.1. L'olfaction..... 6

 3.1.1. Perception des odeurs..... 7

 3.1.2. Définition de l'odeur..... 7

 3.1.3. Caractéristiques et dimensions des odeurs..... 7

 3.1.4. Les dimensions de la perception sensorielle..... 8

4. Le système olfactif chez l'humain..... 9

 4.1. Les récepteurs olfactifs et le codage neuronal de l'odeur..... 11

5. La gustation..... 15

 5.1. Le goût..... 15

 5.2. Le rôle du goût..... 15

 5.3. La langue humaine..... 16

 5.3.1. Les papilles et les bourgeons du goût..... 17

 5.3.2. Autres cellule des papilles du goût..... 19

 5.4. Localisation des sensibilités sur la langue..... 19

6. Le stimulus..... 20

 6.1. Les goûts de base..... 21

7. La chaîne sensorielle et l'analyse du message gustatif..... 21

 7.1. La transduction..... 22

 7.2. Codage de l'information..... 25

7.3.	Les vois et les centres gustatives.....	26
------	---	----

Chapitre II : les capteurs électroniques

1	Le nez électronique.....	28
1.1.	Analyse des odeurs.....	28
1.1.1.	Analyse sensorielle.....	28
1.1.2.	Analyses physico-chimiques.....	29
1.2.	Le nez à capteurs de gaz.....	29
1.2.1.	Principe général des analyses par le nez électronique.....	31
1.2.2.	Les principales étapes de la reconnaissance olfactive.....	32
2	La langue électronique.....	32
3	Les capteurs chimiques.....	35
3.1.	Capteurs chimiques de gaz.....	35
3.1.1.	Définition.....	35
3.1.2.	Principe et fonctionnement.....	36
3.1.3.	Une grande variété de capteurs chimiques gazeux.....	37
3.1.4.	Caractéristiques générales.....	39
3.1.5.	Les capteurs de gaz utilisés dans le nez électronique.....	41
3.2.	Les capteurs ioniques.....	46
3.3.	Les capteurs en milieu liquide.....	47
4	Systèmes de traitement et de reconnaissance de l'information.....	49

Chapitre III : Réseau de neurone artificiel

1.	Réseau de neurone.....	50
2.	Le modèle neurophysiologique.....	50
2.1.	Le neurone.....	50
2.2.	Structure.....	51
2.3.	Fonctionnement.....	52
3.	Définition de RNA.....	53
4.	Le neurone formel.....	53
4.1.	Modélisation d'un neurone formel.....	54
4.2.	Apprentissage du réseau de neurones.....	55
4.2.1.	Définition de l'apprentissage.....	55
4.2.2.	Apprentissage supervisé.....	55

4.2.3. Apprentissage non supervisé.....	56
5. L'architecture du Réseau de neurone.....	56

Chapitre VI : Application

1. Cadre d'étude.....	59
2. L'objectif de travail.....	59
3. Matériel et méthodes.....	60
4. Résultats et discussion.....	66

Conclusion générale	80
----------------------------------	----

Annexe

Produced with ScanTOPDF

Liste des tableaux

Produced with ScanTOPDF

Liste des tableaux

<i>N° tableau</i>	<i>TITRES</i>	<i>PAGES</i>
Tableau 01	Exemple des composés odorants produits par les micro-organismes	5
Tableau 02	Les seuils de perception du goût pour certains composés	6
Tableau 03	Les principaux capteurs utilisés dans le nez électronique	41
Tableau 04	Correspondance entre le gaz détecté et le matériau spécifique déposé en couche mince sur la microbalance à quartz	45
Tableau 05	Avantages et inconvénients des principales technologies de capteurs.	46
Tableau 06	La transition entre le neurone biologique et le neurone artificiel	54
Tableau 07	résultats des mesures des déluitions de NaOH	66
Tableau 08	résultats des mesures des déluitions de KOH	67
Tableau 09	résultats des mesures des déluitions d'acide acétique	68
Tableau 10	résultats des mesures des déluitions HCl	69
Tableau 11	Corrélation des concentrations avec les pH	70
Tableau 12	Corrélation des températures avec les concentrations	70
Tableau 13	Corrélation des conductivités avec les concentrations	71
Tableau 14	résultats de l'étude de corrélation des paramètres de NaOH	73

Tableau 15	résultats de l'étude de corrélation des paramètres de KOH	74
Tableau 16	résultats de l'étude de corrélation des paramètres de HCl	74
Tableau 17	résultats de l'étude de corrélation des paramètres d'Acide acétique	74

Produced with ScanTOPDF

Liste des figures

Produced with ScanTOPDF

Liste des figures

<i>N° figure</i>	<i>TITRES</i>	<i>PAGES</i>
01	Quelques exemples de seuils de perception des odeurs	5
02	Anatomie du système olfactif	11
03	Description simplifiée du processus de transduction au niveau transmembranaire	12
04	La réception des infos par les glomérules	13
05	Représentation schématique du caractère « reconnaissance d'images » et combinatoire de la perception des odeurs	14
06	La langue humaine :	17
07	Les différents types des papilles gustatives	18
08	Les cellules des bourgeons gustatifs	17
09	La localisation des sensibilités sur la langue humaine	20
10	Mécanismes de transduction des différents types du goût	24
11	La transduction du signal chimique en signal électrique au niveau des bourgeons gustatifs	25
12	Voies gustatives périphériques	26
13	Schéma de principe du nez électronique	30
14	Principe de la langue électronique	33
15	Schéma du capteur de gaz	36
16	Schéma de principe de capteurs chimique	37
17	Exemple de courbe de réponse d'un capteur	40
18	Schéma d'un capteur à oxyde métallique semi-conducteur	42
19	Capteur par polymère conducteur	43
20	Microbalance à cristal de balance (capteur acoustique)	44
21	Schéma d'illustration d'un "Ion-sensitive field-effect transistor"	47

22	Le corps cellulaire du neurone	51
23	Un neurone avec son arborisation dendritique	52
24	Le neurone formel (artificiel)	54
25	Réseau monocouche	56
26	Réseau multicouche	57
27	Réseau à connexion complète	57
28	Réseau à connexion locale	58
29	Le matériel utilisé	61
30	Les solutions et les produits chimiques	30
31	RNA pour l'analyse quantitative	72
32	Le RNA pour l'analyse qualitative	76
33	La partie du RNA responsable de la confirmation des résultats.	78
34	RNA finale	79
A	les matrices de la couche 2	Annexe

Introduction générale

Produced with ScanTOPDF

Introduction Générale

L'important développement industriel et les évolutions sociales majeures de ces dernières décennies sont à l'origine de l'avènement de la qualité qui occupe aujourd'hui une place à part entière dans les entreprises. [24]

Le contrôle de la qualité est essentiel dans l'industrie agroalimentaire et il devient de plus en plus important d'avoir une assurance qualité efficace. Les consommateurs attendent une qualité adéquate à un prix donné, une bonne durée de conservation et une sécurité élevée, tandis que les contrôles alimentaires exigent de bonnes pratiques de fabrication, sécurité, et respect des réglementations. En outre, les producteurs agroalimentaires demandent de plus en plus des méthodes de contrôle efficaces, d'abord pour satisfaire le consommateur et les exigences réglementaires, et ensuite pour améliorer la faisabilité industrielle, le triage selon la qualité, l'automatisation et la réduction des coûts de production et du temps de production (augmentation de la production maximale). [15]

Si la qualité d'un produit alimentaire dépend en premier lieu de caractéristiques physiques, chimiques, nutritionnelles ou encore bactériologiques, les produits doivent répondre également aux attentes sensorielles des consommateurs. Parmi les aspects sensoriels, la dimension olfactive et gustative qui joue un rôle important et rend le contrôle de l'odeur et du goût primordial pour l'évaluation de la qualité des produits. Les techniques classiques permettant de caractériser cette dimension des produits sont, d'une part, l'analyse sensorielle et, d'autre part, l'analyse chimique. [15]

Un capteur est un dispositif capable de répondre à certaine(s) propriété(s) de la substance à analyser, et de transformer cette réponse en un signal électrique. Ce signal peut fournir des informations directes sur le facteur de qualité à mesurer, un nez ou une langue électronique est appareil de mesure composé d'une série de capteurs chimiques non spécifiques couplés à un système de traitement de l'information, la réaction de ces capteurs avec les molécules visées forme une empreinte caractéristique qui sera traitée par le système de traitement. Ce système peut être un réseau de neurone artificiel [25]

Un réseau de neurones artificiels est un outil mathématique dont le principe de fonctionnement s'inspire du cerveau humain et qui peut être entraîné à réaliser des tâches particulières et peut analyser les résultats obtenues par les capteurs.

Après cette Introduction, ce manuscrit est divisé comme suit : le premier chapitre consiste en une revue de la littérature sur la qualité de l'aliment et la perception humaine et en particulier le système olfactif et gustatif.

Le second chapitre traite la technologie du nez et de la langue électroniques et leurs capteurs, pour le troisième chapitre, une petite introduction sur le réseau de neurone artificiel est présentée. Dans le quatrième chapitre les procédures expérimentales sont décrites, des résultats et des analyses sont présentées.

Chapitre I :

La qualité des aliments et la perception humaine

Produced with Scantopdf

1. La qualité des aliments

Le contrôle de la qualité microbiologique de nos aliments a été pendant longtemps limité aux contrôles des produits finis, le plus souvent par rapport à une norme. Ces analyses ont été souvent l'apanage de laboratoires spécialisés car il est bien connu que l'évaluation de la qualité hygiénique de nos denrées alimentaires nécessite beaucoup de matériel, un personnel qualifié et reste encore lourde, longue et coûteuse. En conséquence, cette évaluation est encore difficilement applicable à un nombre d'échantillons représentatifs d'un lot ou d'une production. [15]

La maîtrise de la qualité (*hygiénique* obligatoire et *marchande* souhaitée par le fabricant mais aussi le consommateur).

Cette qualité de nos produits alimentaires peut, au plan microbiologique, être définie de 2 façons :

1.1. La qualité hygiénique

L'innocuité d'un aliment correspond à une qualité seuil et la norme zéro défaut doit être atteinte pour certains systèmes aliment-microorganisme en particulier à partir du moment où la présence du microorganisme dans le produit risque d'avoir une incidence défavorable et parfois très grave sur la santé du consommateur. [15]

1.2. La qualité marchande

Concerne essentiellement les caractéristiques organoleptiques et se traduit par un attrait ou une répugnance par les consommateurs. Ses incidences économiques sont déterminantes pour l'industrie alimentaire. Les caractéristiques nutritionnelles et technologiques de l'aliment contribuent à cette qualité.

Tous nos aliments peuvent être le siège de prolifération microbienne, prolifération d'autant plus variée que le produit est "riche" en éléments nutritifs et placé dans des conditions favorables à la croissance microbienne. Ainsi la plupart de nos aliments (non soumis à des traitements antimicrobiens) ont des charges microbiennes comprises entre 10⁴ et 10⁶/g. Au cours de cette prolifération des modifications d'aspect (couleur, limon), de texture, de flaveur (odeur et saveur) apparaissent. Les microorganismes les plus souvent rencontrés appartiennent aux genres *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Moraxella*, *Alcaligenes*,

Aspergillus, *Rhizopus*, *Clostridium sporogenes* et *Flavobacterium*, et les modifications qu'ils engendrent sont le plus souvent défavorables (odeur putride, limon, rancissement, liquéfaction etc...). Parfois cette prolifération est souhaitée (bière, vin, yaourt, beurre,

fromage, saucisson, choucroute, anchois etc...): il s'agit alors de fermentations contrôlées, de biotransformations, de production de biomasse. [15]

2. Incidences de la contamination sur la qualité marchande

La prolifération de microorganismes dans un produit alimentaire se traduit par des modifications des qualités organoleptiques généralement détectables quand le nombre de germes dépasse les 10⁶ par g de produit. Les modifications d'aspect (couleur, limon), de texture ou de flaveur (odeur et saveur) sont souvent défavorables. [15]

2.1. Relations microorganisme / composition de l'aliment

- A partir des glucides de l'aliment (et dérivés)

Polymères (amidon, cellulose) : hydrolyse : texture modifiée

Dimères et monomères (saccharose, maltose, lactose, glucose, fructose, etc.) : fermentations : formation d'acides et de composés carbonylés par exemple : incidence sur le goût et l'arôme

- A partir des protéides de l'aliment (et dérivés)

Polymères (protéines) : hydrolyse : texture modifiée

Acides aminés : décarboxylation, désamination, désulfuration etc. : modifications du goût, de l'odeur, formation de catabolites toxiques

- A partir des lipides de l'aliment (et dérivés) : oxydation et lipolyse (goût).

2.2. Modifications de l'odeur

Le développement de microorganismes dans un produit est d'abord détecté par des modifications d'odeurs en raison de la sensibilité de notre système olfactif. Le seuil de détection de composés organiques volatiles se situe en moyenne à 10⁻⁶ – 10⁻⁹ g (10⁻¹² pour des dérivés de la pirazine).

Généralement, ces modifications sont biphasiques :

- Une grande partie de l'aliment est transformée en un produit dominant (acide acétique - éthanol) : il peut s'agir d'une altération (aigre...) ou d'une transformation souhaitée.

Si le produit est riche en glucides et a un pH > 6 il y a tendance à la fermentation lactique.

Si le produit a un $\text{pH} < 4$ et sans O_2 , tendance à la fermentation alcoolique. Cette altération primaire est détectable à partir d'un seuil d'environ 10^8 germes/g.

- Production d'odeurs caractéristiques liées à des composés organiques volatiles (odeur - goût) ou non (goût). Le seuil de détection de ces composés odorants varie de 10^{-6} à 10^{-12} g.

	Odeur	$\mu\text{g/l}$
2-(isobutyl), 3-méthoxy-pyrazine	poivron	$2 \cdot 10^{-3}$
méthylmercaptan	café	$2 \cdot 10^{-2}$
2,4-décadiène	poulet	$7 \cdot 10^{-2}$
éthyl-2-méthyl butyrate	pomme	10^{-1}
3-hexène	tomate	$3 \cdot 10^{-1}$
γ -décalactone	pêche	$7 \cdot 10^{-1}$
acétate d'amyle	banane	5
éthanol		10^8

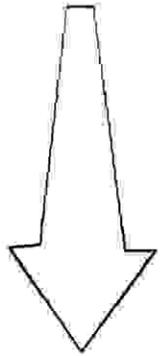


Figure 01: Quelques exemples de seuils de perception des odeurs [15]

Les composés odorants produits par les microorganismes sont pour la plupart d'entre eux détectés, quand la charge microbienne atteint 10^6 à 10^7 germes/g.

Il n'est généralement pas possible d'attribuer à chaque microorganisme la genèse d'une odeur particulière. Cette production est fonction de la composition d'aliment, de la température, de la souche etc... Néanmoins les moisissures engendrent souvent une odeur de moisi (complexe) ou de rance tandis que les bactéries génèrent des odeurs agréables, fruitées ou désagréables. [21]

Tableau 01: exemple des composés odorants produits par les micro-organismes

Micro-organisme	Odeur produit
Pseudomonas	: odeur de tilleul (milieux pauvres en matières organiques)
Achromobacter ou Flavobacterium	: odeur de pomme ou de navet (bière)
Bacillus subtilis	: odeur de melon pourri
Streptomyces	: odeur de moisi

2.3. Modifications du goût

La plus fréquente correspond à une acidification liée à la production d'acide lactique. Divers qualificatifs sont utilisés par derrière cette transformation : piquure, aigri ssement,... Cette modification est favorable avec certains produits (fromages, choucroute, saucisson) Dans le cas du vinaigre c'est l'acide acétique qui est produit. [15]

Les seuils de perception du goût de certains composés sont indiqués ci-après:

Tableau 02: les seuils de perception du goût pour certains composés

Composé	Seuil de perception
NaCl	: 0,25 %
Saccharose	: 0,5 %
HCl	: 0,007 %
Quinine	: $5 \cdot 10^{-5}$ %

Certains des goûts liés à la présence de quelques microorganismes sont décrits ci-après:

- Goût de noisette** : Leuconostoc citrovorum : diacétyle : beurre.
- Rancissement** : Pseudomonas
- Goût de malt** : levures dans le lait
- Goût caramélisé** : levures ou Streptococcus lactis var. maltigenes dans le lait
- Goût alcoolisé** : levures
- Goût douçâtre** : levures (production de mannitol) : vin
- Goût crayeux** : levures (Endomycopsis ou Trichosporum) : pain
- Goût amer** : Lactobacillus, Leuconostoc transforment le glycérol en acroléine qui se combine avec des polyphénols : bière.

3. Les capteurs biologiques humains

3.1. L'olfaction

Les sens chimiques que sont l'odorat et le goût permettent aux êtres vivants d'identifier et de réagir aux substances présentes dans leur environnement. Cette aptitude existe, sous des formes plus ou moins différenciées et évoluées, depuis les êtres unicellulaires jusqu'aux mammifères supérieurs. Le sens de l'odorat est indiscutablement le plus sensible et le plus subtil. L'Homme n'est pas, et de loin, l'espèce ayant les meilleures performances en la

matière; néanmoins, le nez humain se révèle être un détecteur des molécules odorantes plus sensible que la plupart des capteurs physico-chimiques connus. [1]

Bien que l'olfaction ne soit pas un sens vital pour notre espèce, elle contribue sur le plan hédonique à l'appréciation des fragrances, des aliments et des boissons. La saveur des aliments est en effet sous la dépendance de la perception olfactive, par le biais des molécules odorantes libérées dans le palais et véhiculées vers la muqueuse olfactive par la voie rétronasale. Le nombre d'odeurs différentes que l'on peut distinguer est sujet à discussions, mais peut atteindre plus de 10 000 pour un professionnel entraîné, et ceci à des concentrations qui peuvent être extrêmement faibles. [1]

3.1.1. Perception des odeurs

Cette section traite de la perception des odeurs. Une description générale du système olfactif humain et de son fonctionnement est tout d'abord présentée. Suit ensuite une discussion portant sur les caractéristiques des odeurs et sur les dimensions de leur perception. [10]

3.1.2. Définition de l'odeur

Odeur: nom féminin (latin *odor*). Emanation volatile qui se dégage de quelque chose et que l'on perçoit par l'odorat; les odeurs sont liées aux caractéristiques moléculaires des substances.

C'est une molécule chimique, sa perception provient de l'interaction de molécules chimiques, émises ou transformées dans l'air, avec le système olfactif.

Les substances appartiennent aux principaux composés suivants :

- Composés azotés (amine, ammoniac)
- Acides gras volatiles.
- Aldéhydes et cétones
- Composés soufrés (hydrogène sulfuré, sulfure et disulfure)
- Mélanges de ces composés. [10]

3.1.3. Caractéristiques et dimensions des odeurs

On estime qu'il existe plus de 400 000 substances odorantes dans l'environnement et que seulement 200% d'entre elles ont une odeur jugée plaisante [Hamaïzu 1969 cité dans Engen 1982]. Les composés odorants peuvent aussi bien être de nature organique qu'inorganique [prokop 1992]. Toutefois, pour qu'une substance soit odorante, elle se doit de répondre à certains critères:

a. **Volatilité** : la tension de vapeur de la substance doit être suffisamment élevée pour que ses molécules puissent atteindre la muqueuse olfactive. Règle générale, les composés de masses molaires inférieures à 300 g/mol présentent cette caractéristique [Martin 1991]

b. **Solubilité** : les molécules doivent être partiellement hydrosolubles et partiellement liposolubles afin d'être absorbées dans le mucus olfactif (solution aqueuse) puis dans la couche lipidique recouvrant les cils olfactifs.

c. **Adsorbabilité** : caractéristique requise pour que les molécules puissent être adsorbées à la surface des cils olfactifs.

d. **Réactivité** : d'une façon ou d'une autre, la substance doit produire une réaction des récepteurs olfactifs. Tel que mentionné précédemment, les phénomènes impliqués dans ce processus sont encore mal compris. [10]

3.1.4. Les dimensions de la perception sensorielle

Par ailleurs, la perception sensorielle d'une odeur compte quatre dimensions, soient la détection, la quantification, la qualification et l'appréciation de l'odeur. Ces quatre aspects sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

a. Détection

La détection d'une odeur fait référence à la concentration minimale d'un stimulus odorant requise pour produire une réponse olfactive. Deux types de seuil de perception olfactif peuvent être évalués : Le seuil de détection correspond à la plus faible concentration à laquelle une odeur peut être détectée alors que le seuil de reconnaissance est défini comme étant la plus faible concentration pour laquelle l'odeur est reconnue. [10]

En général, le seuil de reconnaissance est de cinq à dix fois plus grand que le seuil de détection. Le sens de l'odorat variant d'une personne à l'autre, l'évaluation d'un seuil de perception se fait sur la base d'un échantillon représentatif d'une population donnée. La valeur qui lui est attribuée est habituellement la concentration correspondant à une réponse positive de la moitié des membres du jury. Il faut noter qu'un seuil de perception olfactif n'est pas une constante physique, mais bien un estimé statistique valable pour un groupe d'individus donné.

b. Qualification

La qualité est la caractéristique qui permet de reconnaître une odeur et de la différencier des autres odeurs. La qualité odorante peut être décrite par le biais de termes descriptifs et plusieurs systèmes de classification ont été proposés à cette fin. Le nombre de

descripteurs employés varie cependant grandement d'un système de classification à l'autre, affaiblissant ainsi l'hypothèse de l'existence d'odeurs dites primaires. [10]

c. Quantification

L'intensité odorante est une mesure de la grandeur de la sensation perçue pour des concentrations supérieures au seuil de détection olfactif d'un composé ou d'un mélange odorant.

d. Appréciation

L'appréciation, dernière dimension de la perception d'une odeur, est aussi connue sous le terme de ton hédonique. Le ton hédonique est un jugement du caractère plaisant ou déplaisant d'une odeur. Fonction de la qualité et de l'intensité de l'odeur, le ton hédonique est également influencé par le temps et la fréquence d'exposition. L'appréciation d'une odeur est un attribut hautement subjectif. Ce qui est plaisant dans un contexte sera désagréable dans d'autres circonstances, ce qui est agréable selon un individu sera répugnant pour un autre.

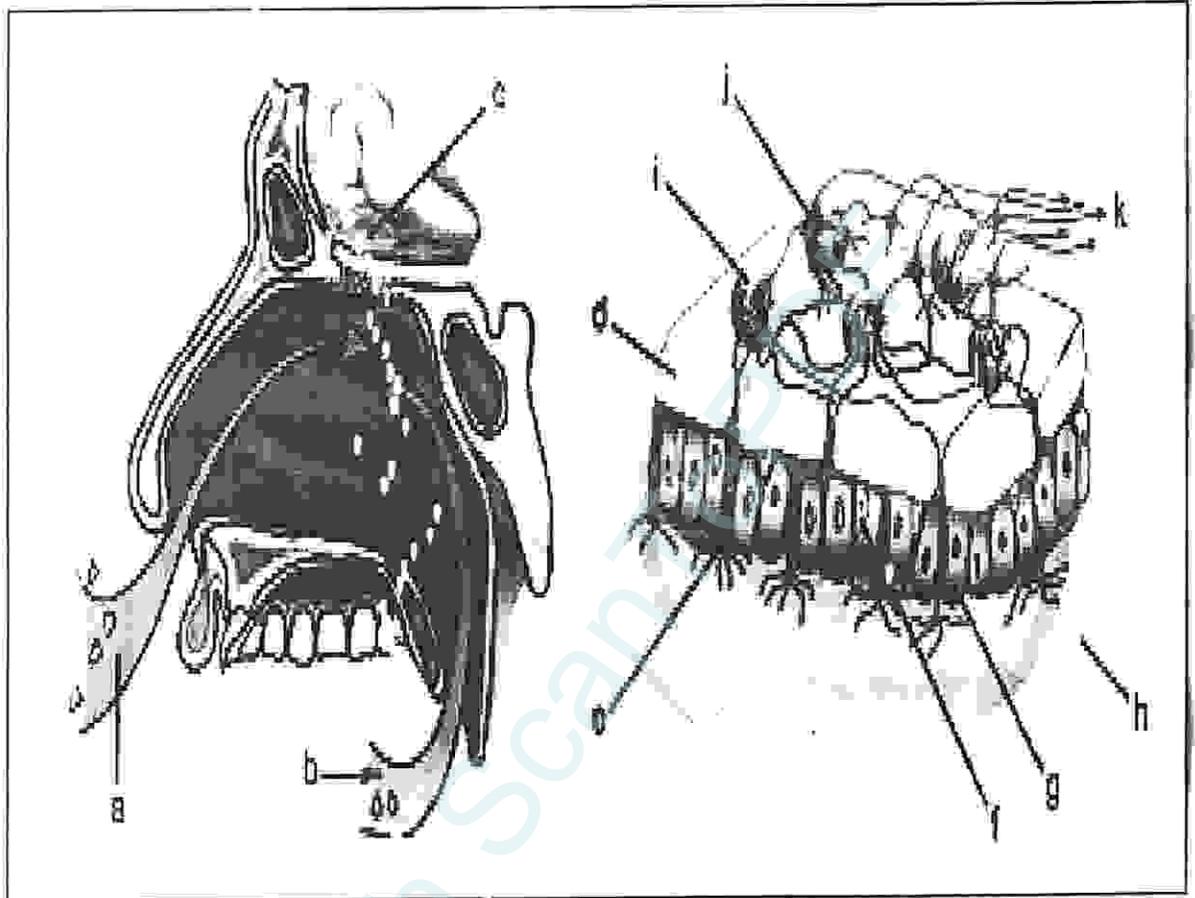
4. Le système olfactif chez l'humain

Une odeur est perçue lorsque des molécules d'un composé odorant atteignent l'épithélium olfactif, région de 2 à 3 cm² située dans la fente olfactive sur les parois supérieures des cavités nasales et qui constitue l'organe récepteur de l'olfaction chez l'humain [Engen 1982, Duchamp et al. 1991]. L'inspiration par les narines du nez constitue la principale porte d'entrée des molécules odorantes à l'épithélium olfactif, mais l'accès est également possible par le biais de la voie rétro-nasale lors de la déglutition. L'épithélium olfactif est un tissu d'une épaisseur d'environ 75 µm recouvert d'une couche de mucus et renfermant les récepteurs olfactifs. On estime que le nez humain compte plusieurs millions de récepteurs olfactifs [Engen 1982, Duchamp et al. 1991], partagés en un millier de types différents [Axel 1995]. Considérant que l'homme est en mesure de détecter plus de 10 000 odeurs distinctes, il apparaît que nos cellules olfactives sont non-spécifiques, caractéristique fondamentale d'un odorat de type généraliste [Laffort 1997]. Ainsi, un récepteur donné réagira de façon plus ou moins prononcée selon la nature des molécules en présence. [4]

La perception olfactive trouve son origine dans l'interaction entre les composés chimiques volatils transportés par l'air inhalé, par voie directe ou rétronasale, et les neurones olfactifs (NO) situés dans l'épithélium du même nom qui occupe chez l'Homme une surface d'environ 2,5 cm² dans la partie supérieure de la cavité nasale (voir figure 1). L'extrémité dendritique de chaque NO porte une touffe de 20 à 30 cils ayant entre 50 et 200 microns de longueur qui baignent dans le mucus recouvrant l'épithélium. Le mucus contient de

nombreuses protéines et assure diverses fonctions : défense immunitaire, détoxification, concentration et élimination des molécules odorantes et lavage permanent de la muqueuse. [4]

L'existence de récepteurs spécifiques portés par les cils des neurones olfactifs avait été postulée depuis longtemps, mais leur nature protéinique exacte n'avait pas été établie avant les travaux d'Axel et Buck. A leur autre extrémité, les NO prolongent leurs axones qui se regroupent en faisceaux de 10 à 100 axones. Ces faisceaux traversent la lame osseuse criblée de petits trous de l'os ethmoïde, situé à la base du crâne, pour converger dans le premier niveau de connexions synaptiques avec d'autres neurones relais appelés cellules mitrales. Les amas de connexions synaptiques constituent les glomérules qui sont localisées dans les deux bulbes olfactifs. Le taux de convergence est très élevé puisque chaque glomérule reçoit les terminaisons des axones de plusieurs milliers de neurones olfactifs. Les axones des cellules mitrales forment les filets nerveux qui vont assurer les connexions avec le cortex olfactif. Les études de l'activité du cerveau par diverses méthodes complémentaires : électroencéphalographie (EEG), magnétoencéphalographie (MEG), tomographie par émission de positon (TEP), imagerie de résonance magnétique nucléaire fonctionnelle (IRMf), montrent que de nombreuses autres zones du cerveau sont activées lors des stimuli olfactifs. En particulier, c'est le cas du thalamus, de l'amygdale rattachée au système limbique concerné par les émotions, et du cortex orbito-frontal. L'information olfactive n'est donc jamais pure mais se trouve associée à son contexte sensoriel global et émotionnel. [4]



a- air inspiré par voie directe ou orthonasale. b- air inspiré par voie rétro nasale. c- bulbe olfactif. d- os ethmoïde. e- neurone olfactif. f- cellule basale. g- cellule de soutien. h- mucus. i- glomérule. j- cellule mitrale.
k- vers le cortex olfactif

Figure 02: Anatomie du système olfactif [4]

4.1. Les récepteurs olfactifs et le codage neuronal de l'odeur

En 1991, L. Buck et R. Axel publient une étude fondamentale qui ouvre la voie à la compréhension des bases moléculaires de la perception des odeurs. Afin d'identifier la présence de récepteurs dans les neurones olfactifs de l'épithélium, ils ont émis l'hypothèse que ces récepteurs appartenaient à la grande famille des protéines de type GPCR (« G protein-coupled receptor »). Ces protéines sont connues pour permettre la communication chimique entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule. Elles reçoivent le « signal chimique » à l'extérieur de la cellule et le transfèrent à l'intérieur en activant la protéine G associée. Celle-ci initie alors la production d'un ou plusieurs messagers chimiques secondaires, notamment l'AMP cyclique, dont l'action déclenche l'ouverture des canaux ioniques de la cellule. Le flux d'ions qui en résulte entraîne une modification de l'état de polarisation de la membrane. Lorsque cette dépolarisation est suffisante, elle provoque la transmission de l'influx nerveux par

l'intermédiaire de l'axone vers les glomérules qui constituent le premier niveau d'intégration du signal olfactif. La figure 2 décrit d'une manière simplifiée ce processus de transduction au niveau transmembranaire.

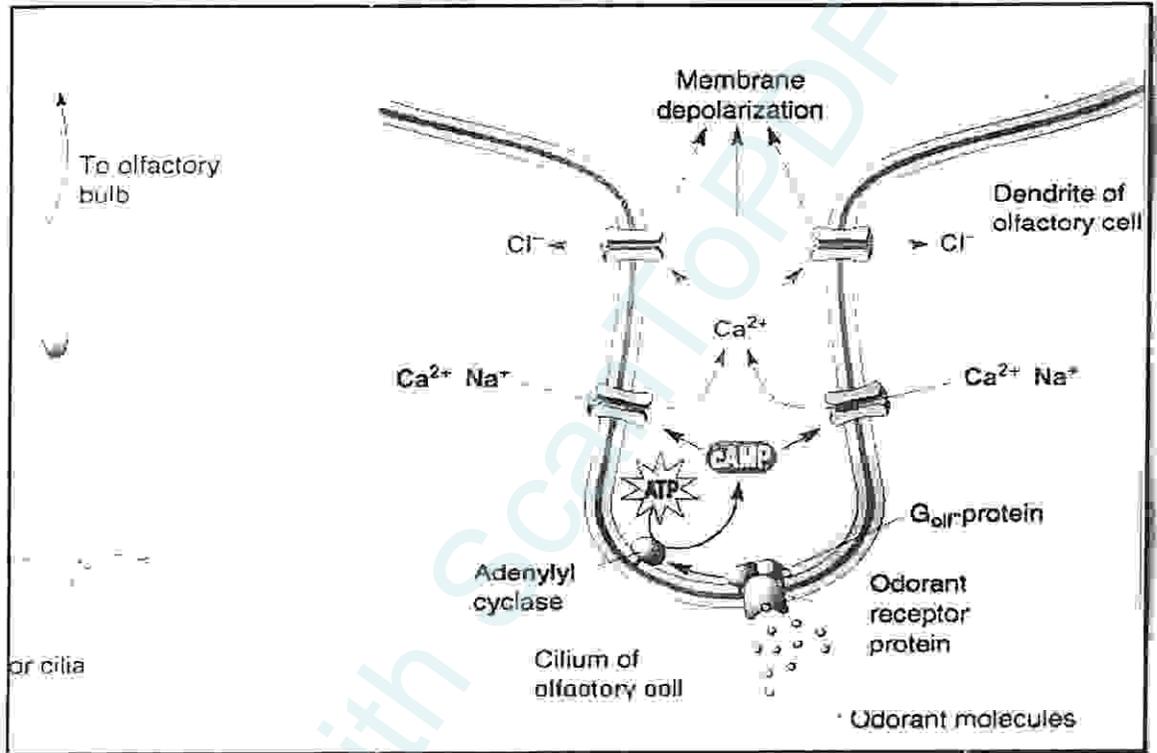


Figure 03: Description simplifiée du processus de transduction au niveau transmembranaire [24]

Les molécules odorantes (O), présentes dans l'air, sont captées par les protéines de transport (OT), puis conduites à travers le mucus vers le récepteur olfactif transmembranaire (OR). Ce récepteur active alors une protéine G intracellulaire (G) qui libère sa sous-unité activée (G_{α} Adényl Cyclase). Celle-ci va initier la production de messagers chimiques, notamment l'adénosine monophosphate cyclique (AMPc) à partir de l'adénosine triphosphate (ATP), via l'activation de l'adénylate cyclase* (AC et sa forme activée ACa). La cascade d'événements se poursuit par la modification de l'état de polarisation de la membrane, effectuée par échange d'ions Cl^{-} , Na^{+} et Ca^{2+} .

Il a été établi qu'un neurone olfactif donné n'exprime qu'un seul type de récepteur, que chaque type de récepteur a des affinités plus ou moins fortes pour plusieurs odorants et que, corrélativement, une molécule odorante peut activer plusieurs récepteurs. En conséquence, différents odorants activent plus ou moins intensément des ensembles distincts de récepteurs olfactifs qui peuvent néanmoins se recouvrir partiellement.

Ces résultats éclairent d'un jour nouveau la question du type d'interactions se produisant entre les molécules odorantes et leurs récepteurs. Celles-ci ne sont pas très spécifiques et le modèle qui en résulte est fort éloigné du paradigme un peu simpliste « clef-serrure » souvent évoqué dans les modèles d'interactions biologiques. En fait, il ne s'agit pas ici de reconnaître une molécule particulière, ce qui serait inefficace compte tenu de la grande variété des structures chimiques des odorants. La reconnaissance se fait par un processus faisant intervenir des affinités relatives avec de multiples récepteurs, de telle sorte que l'information qui en résulte est de nature combinatoire. D'autre part, des travaux récents ont établi que tous les neurones qui portent le même récepteur olfactif projettent leur axone vers un seul (ou peut être deux) glomérule, et ce quelle que soit leur localisation dans l'épithélium. Enfin, il a été montré que les glomérules suivent une organisation topologique stable au sein du bulbe olfactif. [4]

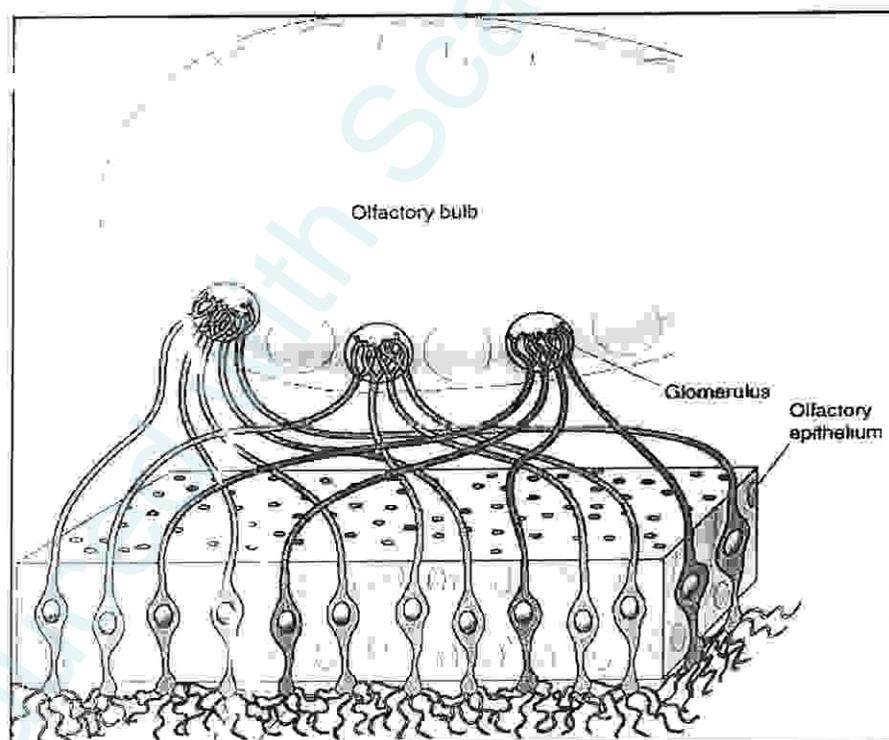


Figure 04: La réception des infos par les glomérules [24]

La reconnaissance des odeurs s'apparente donc à la reconnaissance de formes et on est en droit de parler d'image olfactive projetée au sein du bulbe olfactif. Le nombre élevé de types de récepteurs olfactifs, le caractère combinatoire de l'information et cet aspect « reconnaissance de formes » permet de comprendre que l'on soit capable de distinguer l'odeur d'un nombre incroyablement élevé de molécules différentes. Si l'on admet qu'une molécule odorante donnée peut activer seulement trois récepteurs différents (en fait elle interagit avec un nombre bien plus élevé), le nombre théorique de molécules que l'Homme serait

susceptible de discriminer serait de l'ordre de 40 millions. Un nombre du même ordre de grandeur que celui de toutes les molécules connues à ce jour. [4]

Représentation schématique du caractère « reconnaissance d'images » et combinatoire de la perception des odeurs

Les assertions suivantes font actuellement l'objet d'un consensus :

- Chaque neurone olfactif **NO** n'exprime qu'un seul type de récepteur **RO**.
- Une molécule **M** peut activer plus ou moins fortement plusieurs **NO** portant des **RO** différents.
- Les axones des **NO** portant le même **RO** convergent vers un même glomérule.
- Les glomérules ont une organisation spatiale dans le bulbe olfactif stable.

Les figures ci-dessous représentent d'une manière schématique le caractère « reconnaissance d'image » et combinatoire de la perception des odeurs.

A : réponse d'un **NO** à une molécule **M** représentée par une couleur plus ou moins rouge.

B : activation des glomérules par une molécule **M1**. L'ensemble des glomérules plus ou moins activés forme une « image » qui est interprétée comme l'odeur de **M1**.

C : activation des glomérules par une autre molécule **M2** conduisant à une image olfactive différente.

D : activation simultanée des glomérules par **M1** et **M2**. Selon le cas, on peut reconnaître les deux odeurs, ou une odeur différente de celle des deux molécules.

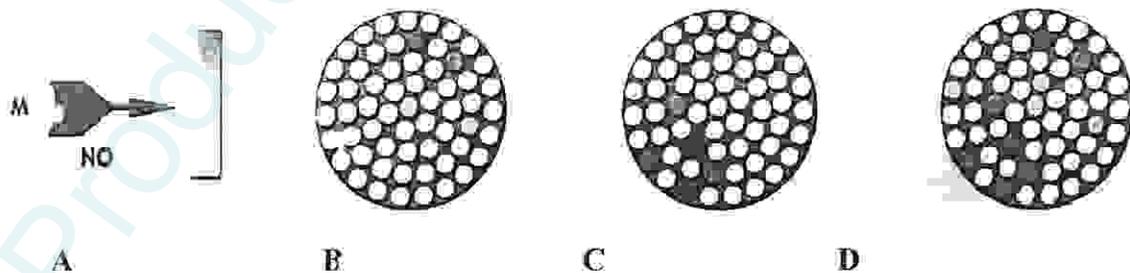


Figure 05: Représentation schématique du caractère « reconnaissance d'images » et combinatoire de la perception des odeurs [4]

Bien que les principales composantes du système olfactif humain soient clairement identifiées, les mécanismes régissant l'olfaction sont encore très nébuleux. Plus particulièrement, l'étape de stimulation des récepteurs olfactifs par les molécules odorantes demeure en grande partie inexpliquée. Plusieurs théories, basées sur des approches physique, chimique et biologique ont été élaborées à ce jour, mais aucune d'entre elles ne permet une explication complète de la nature des interactions à la base de l'odorat. La tâche n'est pas aisée. En effet, comment concilier le fait que deux isomères optiques puissent avoir des odeurs différentes (par exemple le 1-carvone et le d-carvone qui ont des odeurs respectives de menthe verte et de graines de carvi [Engen 1982] alors que deux composés dont les formules moléculaires sont très dissemblables puissent dégager des odeurs similaires (par exemple l'arsine AsH_3 et l'acrylonitrile C_3H_3N , deux molécules ayant une odeur d'ail [AIHA 1989])? On en déduit donc que ce qui rend une molécule odorante *est* une fonction complexe des caractéristiques des groupements fonctionnels présents, mais aussi de la configuration spatiale de la molécule. En ce qui concerne le codage de l'information recueillie par les récepteurs olfactifs. [6]

5. la gustation

5.1 Le goût

L'étymologie nous enseigne que le mot *gout* vient d'un mot indoeuropéen, *geus*, qui signifie « éprouver », « estimer », « apprécier ». Effectivement, le goût nous permet d'éprouver ou de juger directement notre environnement. Beaucoup de personnes estiment que le goût est le sens qui nous procure le plus de plaisir. Nous rechignons certainement à avaler les substances qui ont un goût désagréable. [1]

L'homme est en permanence stimulé par des molécules chimiques libérées dans l'environnement. Celles-ci sont détectées par des récepteurs qui sont des chémorécepteurs (ou chimiorécepteurs). Les quelques 10 000 récepteurs du goût appelés **calicules gustatifs**, sont disséminés dans la cavité orale. La plupart sont situés sur la langue, mais on en trouve quelques-uns sur le palais mou et la face interne des joues. [1]

5.2. Le rôle du goût

Les hommes sont omnivores et dès le début ils ont du faire la différence entre des nourritures potentielles et des toxiques. Ils ont donc, pour assurer leur survie, développé un système de la détection du goût performant. La réaction d'éviter les substances amères ou

acides vient du fait que plupart des substances amères sont mauvaises pour l'organisme (poisons) et que la nourriture avariée devient acide. Goûter protège ainsi contre les poisons.

D'un autre côté, nous aimons le goût du sucre parce que l'organisme a un besoin absolu d'hydrates de carbone (sucres, etc.). De même, le goût pour le sel vient du fait que nous devons avoir du chlorure de sodium (sel commun) dans notre régime. Enfin, nous avons un besoin absolu de protéines, et les acides aminés sont les constituants des protéines, et c'est le rôle des récepteurs à l'umami, qui donne le goût de la viande, riche en acides aminés. [22]

5.3. La langue humaine

La langue est l'organe du goût principal, mais d'autres parties de la bouche, le palais, le pharynx et l'épiglotte sont également impliquées. L'odeur de ce que nous mangeons passe par le pharynx, dans la cavité nasale, où elle est détectée par les récepteurs olfactifs. L'odorat est donc également fortement impliqué dans le goût, et toutes ces informations sont intégrées pour conduire à la reconnaissance des saveurs. Classiquement, il existe goûts de base correspondant à l'activation de quatre types élémentaires de récepteurs. Ces récepteurs sont classiquement localisés dans des régions différentes de la langue, ce qui confère une sensibilité d'exemple à ces régions : la pointe de la langue est plus sensible aux substances sucrées, les bords aux stimuli salés, la partie médiane externe aux stimuli acides et la base de la langue aux stimuli amers. Néanmoins, on sait actuellement que ces régions ne sont pas aussi spécifiques qu'on le pensait, et qu'en fait toutes les régions de la langue peuvent être sensibles à tous les goûts de base, mais quelques secteurs sont en effet plus sensibles à certain goût que d'autres.

La sensibilité à tout le goût est donc distribuée à travers la langue entière et à d'autres régions de la bouche où il y a des bourgeons de goût (épiglotte, palais mou), qui sont les récepteurs du goût. Pour pouvoir être perçues, les substances doivent être dissoutes dans la salive. Celle-ci contient une protéine capable de se combiner à de nombreuses substances, et ainsi capable de transporter ces substances jusqu'aux récepteurs sensoriels, où s'opère la transduction. [22]

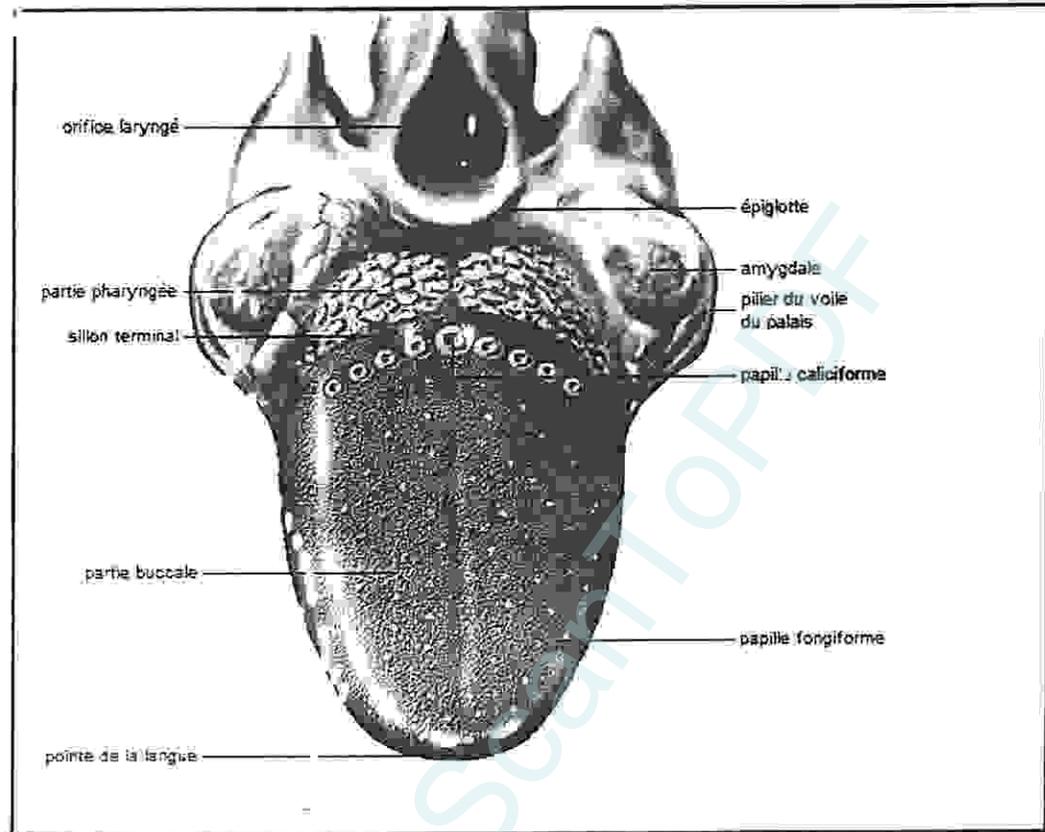


Figure 06: la langue humaine [13]

5.3.1. Les papilles et les bourgeons du goût

Les bourgeons du goût sont situés dans toute la cavité buccale, sur l'épithélium dorsal de la langue où ils sont les plus nombreux (4600 bourgeons, tous types confondus sur la langue), dans le pharynx, l'épiglotte laryngée et à l'entrée de l'oesophage. [22]

Les bourgeons du goût sont des agrégations de 30 à 100 cellules réceptrices neuroépithéliales, allongées (50-60 microns de hauteur, 30-70 microns de largeur), qui sont incluses dans les spécialisations de l'épithélium environnant, nommées des papilles. À l'apex du bourgeon du goût, des microvillosités dépassent dans le milieu buccal par une petite ouverture, le pore de goût. Juste au-dessous de l'apex du bourgeon de goût, les cellules du goût sont connectées par des jonctions serrées. Les cellules réceptrices des bourgeons du goût sont soutenues par des cellules basales qui jouent un rôle dans la transmission de l'information et dans le renouvellement des récepteurs. À la base du bourgeon du goût, les dendrites des neurones secondaires envahissent le bourgeon et se ramifient fortement, chaque fibre faisant synapse avec les multiples cellules réceptrices. Il existe plusieurs types de papilles :

Les papilles fongiformes : sont situées sur la partie la plus antérieure de la langue et contiennent généralement un à plusieurs bourgeons de goût par papille. Ils sont innervés par la

corde du tympan, branche du nerf facial (VII). Ils sont responsables des goûts salé et sucré. Ces papilles apparaissent comme des taches rouges sur la langue parce qu'elles sont fortement vascularisées. Il y a environ 200 papilles fongiformes sur la langue qui totalisent environ 1120 bourgeons du goût. Les papilles à l'avant de la langue ont plus de cellules du goût (1-18) comparés à la mi-région (1-9).

Les papilles foliées : sont situées sur le bord postérieur de la langue. Elles sont principalement sensibles au goût acide. Ils sont innervés par le nerf glossopharyngien (IX). On compte entre 5 et 6 papilles foliées par côté de la langue, qui comprennent chacune environ 120 bourgeons.

Les papilles invaginées: sont des grosses papilles entourées d'un sillon les séparant du mur environnant. Elles forment le V lingual. Les bourgeons sont situés sur le bord interne du sillon des papilles, et confèrent une sensibilité à l'amer au 2/3 postérieur de la langue. Ils sont innervés par le nerf glossopharyngien (IX). On compte de 10 à 13 papilles de invaginées sur la langue, avec 250 bourgeons du goût par papilles.

On décrit également des **papilles filiformes**, qui ont un rôle mécanique et non gustatif. En outre il y a 2500 bourgeons de goût sur l'épiglotte, le pharynx palatin, laryngé et oral mou. Le nombre de bourgeons de goût diminue avec l'âge. [22]

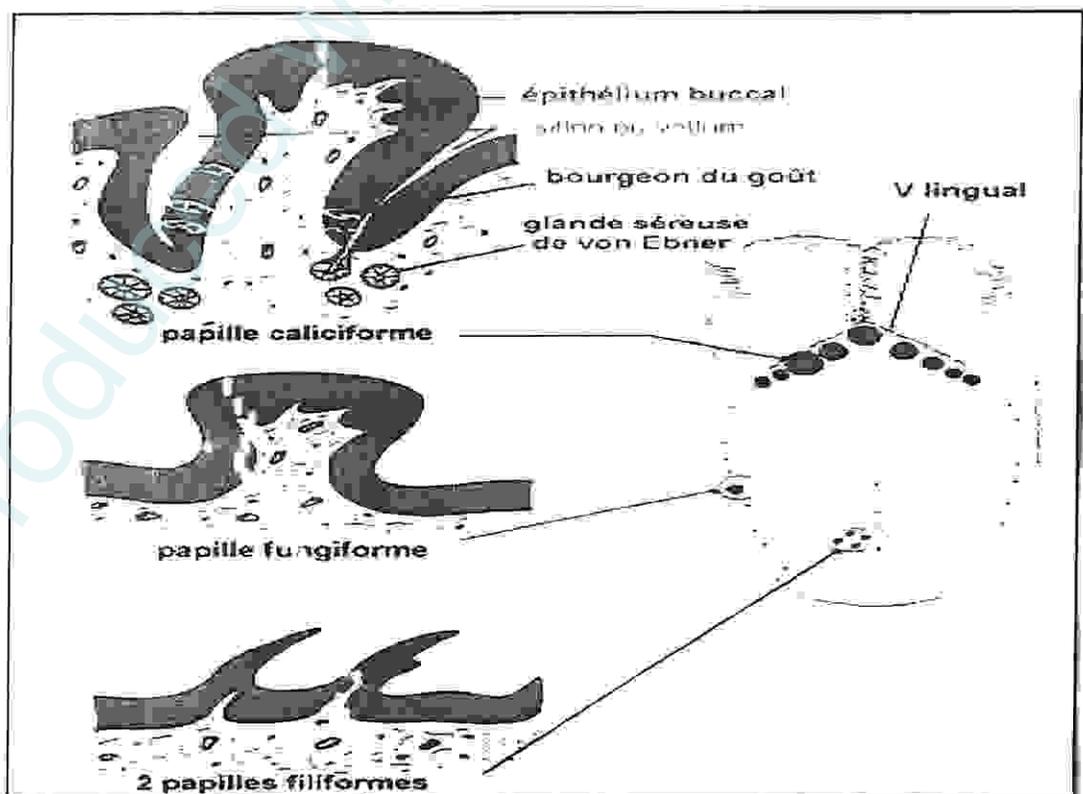


Figure 07: les différents types des papilles gustatifs [21]

5.3.2. Autres cellule des papilles du gout

On trouve également d'autres cellules au niveau des papilles du goût :

Les **cellules support**, qui contiennent les microvillosités, semblent sécréter des substances dans la lumière du bourgeon de goût.

Les **cellules basales** qui se différencient en de nouvelles cellules réceptrices. Elles sont dérivées de l'épithélium environnant. Les cellules réceptrices sont ainsi sans interruption remplacées tous les 10 jours. [11]

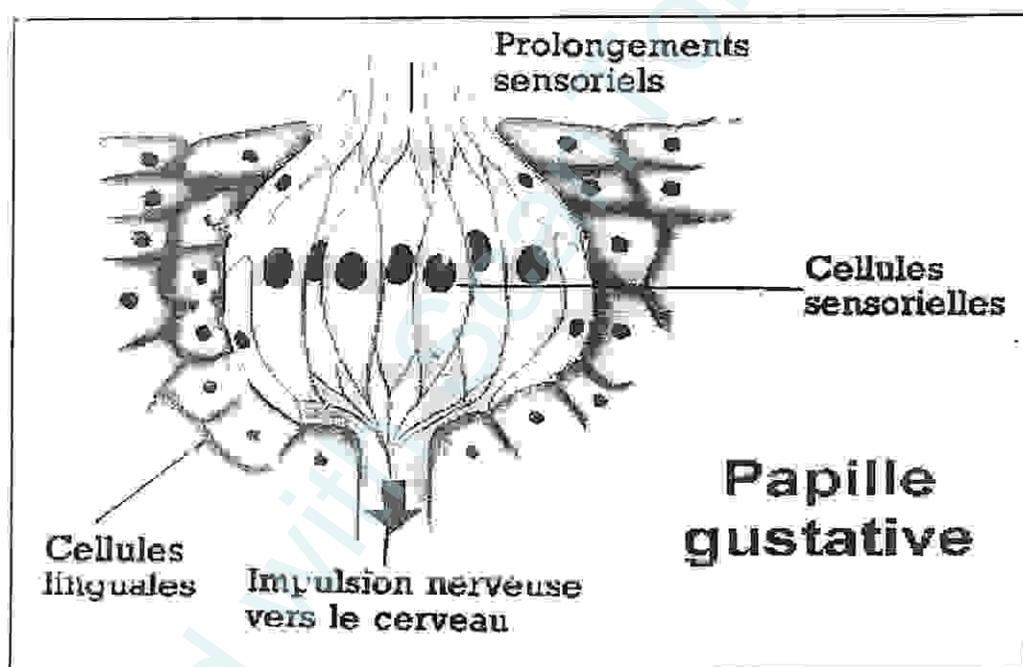


Figure 03: les cellules des bourgeons gustatifs [26]

Les calicules gustatifs se trouvent sur les côtés de la dizaine de papilles circumvallées et sur les papilles fungiformes, plus nombreuses (figure 03). (Les papilles fungiformes sont bien visibles sur la langue après qu'on a bu du lait.) Les papilles filiformes, qui constituent le type de papilles le plus abondant, ne sont pas pourvues de calicules gustatifs; leur rôle serait plutôt de nature mécanique. [1]

5.4. Localisation des sensibilités sur la langue

Une erreur très répandue dans la littérature consiste à présenter une carte des différentes sensibilités qualitatives sur la langue. Pourtant, il est possible de mesurer des seuils localement sur la langue pour différents stimulus. La stimulation de la pointe de la langue, de l'arête latérale, de la région des papilles foliées, de la partie dorsale de la langue, voire du voile du palais, permet d'obtenir une perception consciente et de mesurer une concentration-seuil : on ne peut donc pas prétendre à une localisation quelconque des sensibilités sur la

langue en fonction de la nature du stimulus ; on sent tout, partout, avec une variation quantitative de la sensibilité. La **figure 09** montre la mesure d'intensité perçue lors de stimulations locales au Coton-tige pour neuf molécules différentes, sept zones de langue sur 80 sujets (données personnelles). L'intensité de la perception dépend de la zone : elle est corrélée à la densité de papilles. Un regard minutieux sur les données individuelles nous montre que, de fait, une sensibilité préférentielle peut apparaître localement, mais elle est chaque fois caractéristique du sujet. On trouve également, grâce à ces stimulations localisées, des zones totalement agueusiques probablement par accident iatrogène. [6]

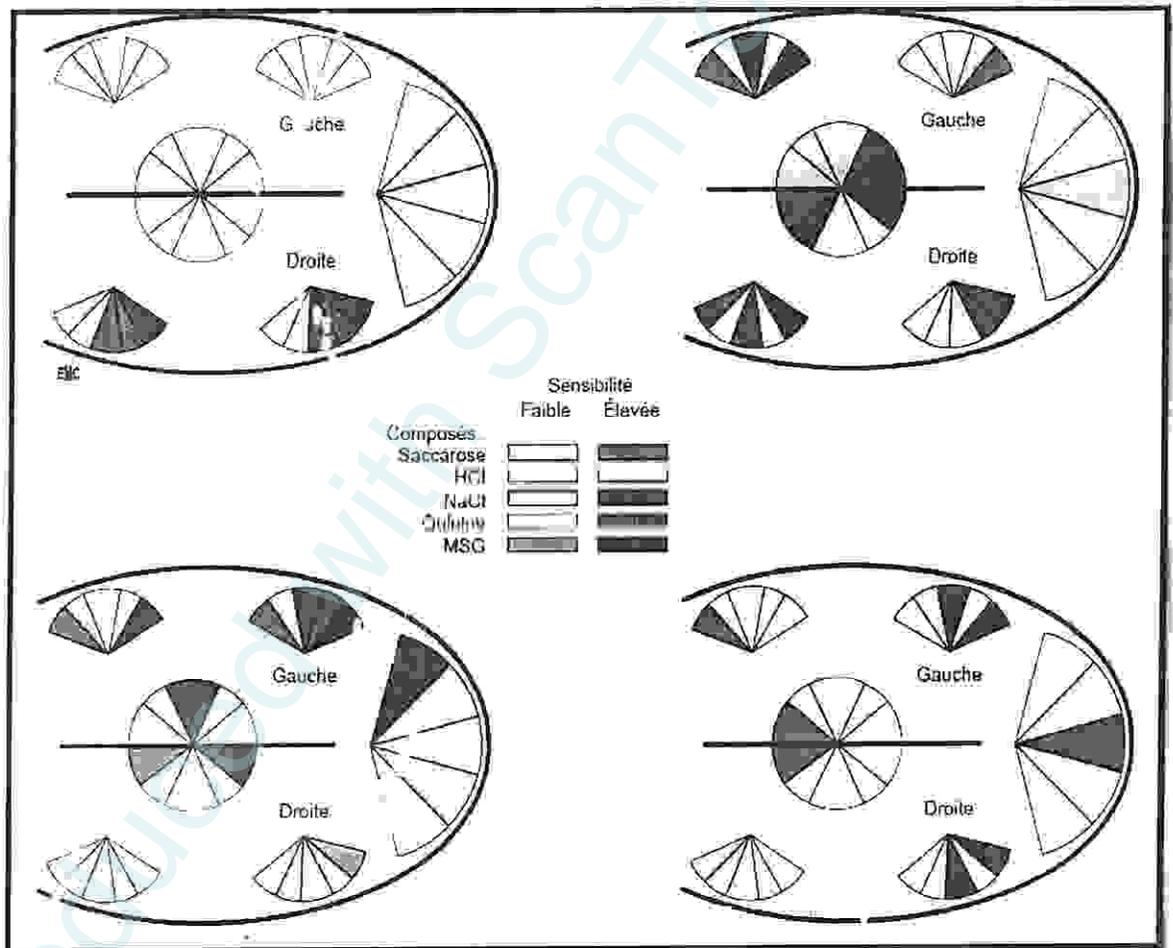


Figure 09: la localisation des sensibilités sur la langue humaine [6]

6. Le stimulus

Le stimulus activant les récepteurs du goût sont des molécules de substances organiques et inorganiques, principalement non volatiles, et solubles dans la salive. La source du stimulus doit être proche ou en contact direct avec les récepteurs. Le nombre de stimuli discernables est faible (cinq), et la sensibilité absolue est assez faible (il faut en moyenne plus de 10¹⁶ molécules par ml pour assurer une détection). Le goût est un sens de contact. [22]

6.1. Les goûts de base

Le nombre des substances chimiques est infini et donc la variété des saveurs incalculable. Il semble que nous ne reconnaissons que quelques goûts de base. On en décrit classiquement quatre qui sont le salé, l'acide, le sucré et l'amer. On décrit maintenant chez l'homme un cinquième goût, moins familier, l'umami, qui signifie « délicieux » en japonais, et qui est en fait le goût du glutamate (le glutamate de sodium est utilisé en cuisine japonaise). La correspondance entre la chimie et le goût est généralement évidente (les acides sont acides, les sels salés, les sucres sucrés), mais ce n'est pas toujours vrai. Le sel (NaCl) peut paraître sucré à faible concentration, des acides aminés peuvent être très sucrés (comme l'aspartame, constitué de deux acides aminés). Les seuils de détection de ces substances varient en fonction de la molécule considérée. Ainsi, la quinine, amère, est détectée à partir d'une concentration de 8 mM, alors que la saccharine, sucrée, est détectée à partir d'une concentration de 23 mM. [22]

7. La chaîne sensorielle et l'analyse du message gustatif

Grâce à la salive, les aliments libèrent des molécules sapides qui se fixent sur les récepteurs chimiques de la langue. Ces bourgeons du goût sont constitués d'un nombre très variable de cellules. Chacun d'eux peut capter plusieurs dizaines de molécules sapides distinctes et il n'est pas spécialisé dans la perception d'une seule saveur. Dans le même temps, il réagit différemment à l'arrivée d'un aliment en fonction du nombre de cellules excitées.

Les goûts sucrés et amers, pourtant antinomiques, peuvent être perçus par les mêmes récepteurs et procurent pourtant une sensation bien différente. Nous percevons en réalité un continuum gustatif qui résulte de nombreuses saveurs mais nous disposons de peu de mots pour exprimer leur diversité [22]

Le goût est dû à la différence de papilles, mais plus particulièrement aux canaux ioniques. En effet, à l'intérieur des cellules réceptrices se situent des canaux ioniques; c'est-à-dire des protéines membranaires capables de transporter des ions. Selon le stimulus du goût, ces canaux vont se boucher ou s'ouvrir pour laisser passer ou non les ions. C'est ce qui est à l'origine de la différence de perception des saveurs. Ce phénomène, qui engendre une variation de potentiel chez les cellules réceptrices de la langue, c'est-à-dire une différence de charges électriques entre les deux parties de la membrane, s'appelle la transduction. [22]

7.1. La transduction

Il existe cinq goûts de base : salé, acide, sucré, amer et umami, correspondant à des mécanismes de transduction différents : [22]

Goût salé

La transduction des stimulations par les substances salées (NaCl) s'effectue directement à partir du passage d'ions Na^+ au travers de la membrane des cellules réceptrices. L'entrée de Na^+ cause une dépolarisation qui entraîne l'entrée de Ca^{++} par les canaux calciques voltage dépendant, qui mobilise et libère le neurotransmetteur à la base de la cellule.

Goût acide

Le goût acide provient des protons (H^+). Les ions H^+ entrent directement au travers de la membrane des cellules réceptrices, sans intervention de récepteurs membranaires spécifiques. Ils bloquent alors les canaux voltage dépendant Na^+ , Ca^{++} et K^+ . La répartition de ces canaux à la surface de la membrane des cellules est telle que les canaux potassiques, localisés dans la région apicale, sont plus facilement bloqués que les canaux Na^+ et Ca^{++} localisés au pôle basolatéral. Les ions H^+ agissent donc essentiellement en fermant les canaux potassiques, ce qui provoque une dépolarisation de la cellule, une entrée de calcium et la libération de neuromédiateur.

Goût sucré

Les substances sucrées (glucose, sucrose et d'autres hydrates de carbone) se combinent à des récepteurs membranaires spécifiques de type « récepteur à second messager ». La liaison au récepteur membranaire provoque l'activation d'une adényl cyclase, ce qui augmente le taux intracellulaire d'AMPc qui va provoquer la fermeture d'un canal potassique normalement ouvert au repos, ce qui entraîne une dépolarisation de la cellule. La dépolarisation induite entraîne une entrée de calcium et la libération de médiateur.

Goût amer

Les substances amères agissent sur des récepteurs spécifiques qui provoquent la mobilisation du Ca^{++} des réserves intracellulaires, soit par la voie de l'IP3, soit par celle de l'AMPc. Cette augmentation du taux intracellulaire de calcium provoque alors la libération de neuromédiateur au pôle basal du récepteur.

Goût umami

Le goût umami est celui de certains acides aminés (par exemple glutamate, aspartate et les composés dérivés). Le glutamate se fixe sur un récepteur métabotropique du glutamate

(mGluR4) et active une G-protéine, ce qui élève le taux de Ca^{++} intracellulaire. Le glutamate monosodique, qui est ajouté à beaucoup de nourritures pour augmenter leur goût (et qui est l'ingrédient principal de la sauce de soja), stimule ainsi ces récepteurs. Mais, il existe également les récepteurs ionotropiques du glutamate (ou récepteur NMDA, liés à un canal sodique). Une fois activés par ces composés au goût d'umami, les canaux sodiques s'ouvrent, dépolarisant de ce fait la cellule, entraînant l'ouverture des canaux calciques voltage-dépendants, et donc la libération de neurotransmetteur. [22]

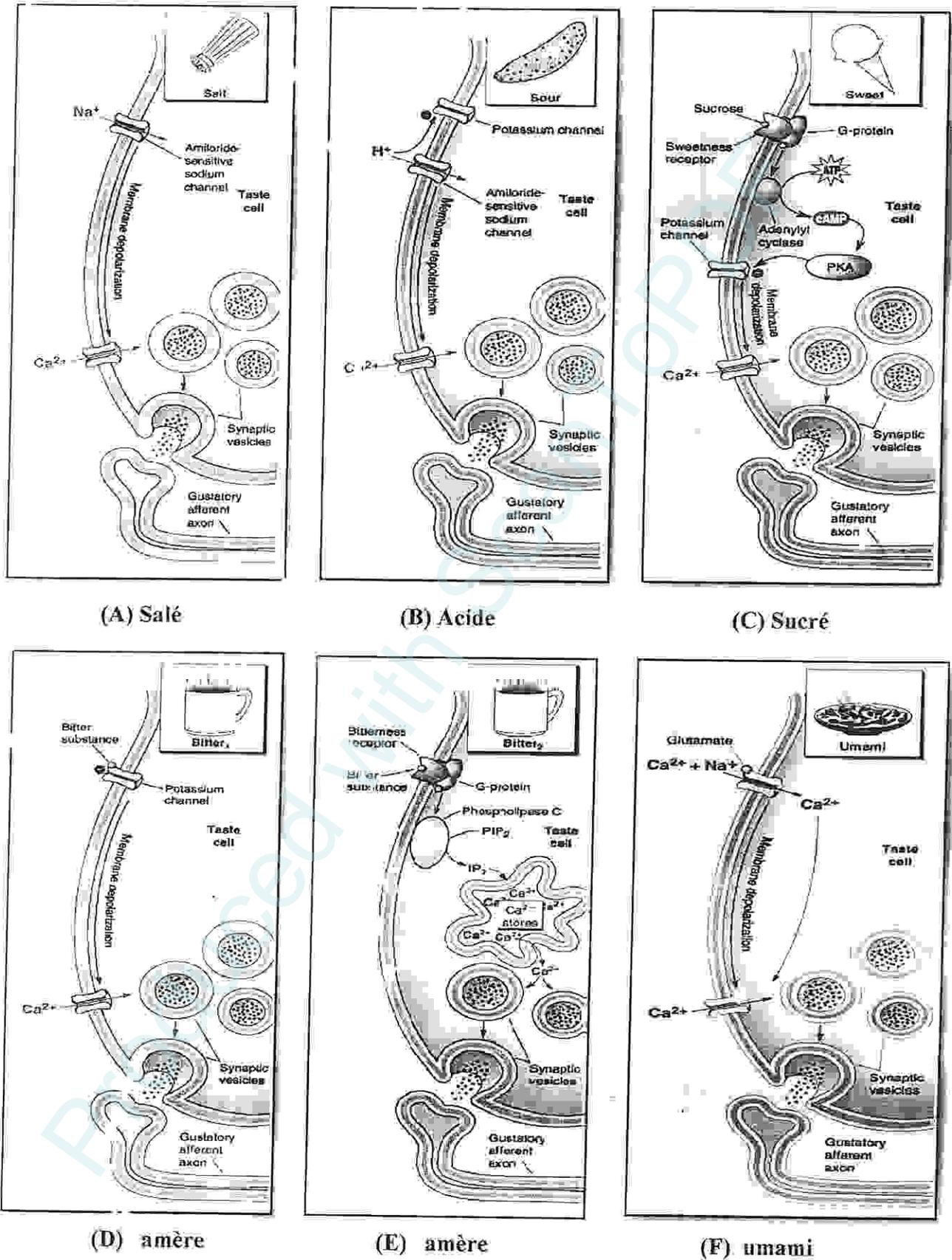


Figure 10: mécanismes de transduction des différents types du goût [13]

7.2. Codage de l'information

Le codage de l'information gustative comprend la transduction du signal chimique en signal électrique au niveau des bourgeons gustatifs, la conduction de cette information, ainsi que son traitement le long des circuits nerveux dans le cerveau.

On a vu que ces récepteurs sont localisés dans des régions différentes de la langue. Ils sont regroupés par modalité, ce qui confère une sensibilité d'ensemble préférentielle à ces régions : la pointe de la langue est plus sensible aux substances sucrées et umami, les bords aux stimuli salés, la partie médiane externe aux stimuli acides et la base de la langue aux stimuli amers. La sensibilité gustative est liée à l'activité de l'ensemble des récepteurs mis en jeu, (on parle de pattern d'activité), puisque chaque fibre reçoit de plusieurs types de récepteur et donc répond à plusieurs types de stimuli. Ce pattern correspond à l'activation de quatre types élémentaires de récepteurs sensibles aux cinq qualités de base : sucré, umami, salé, acide et amer. En pratique une fibre répond à toutes les modalités gustatives, mais avec une fréquence plus ou moins importante. Le pattern d'une fibre est donc la manière dont elle décharge pour les cinq modalités. La Figure 5 montre la fréquence de décharge moyenne de quatre fibres différentes (a, b, c, d) pour cinq types de goûts. [24]

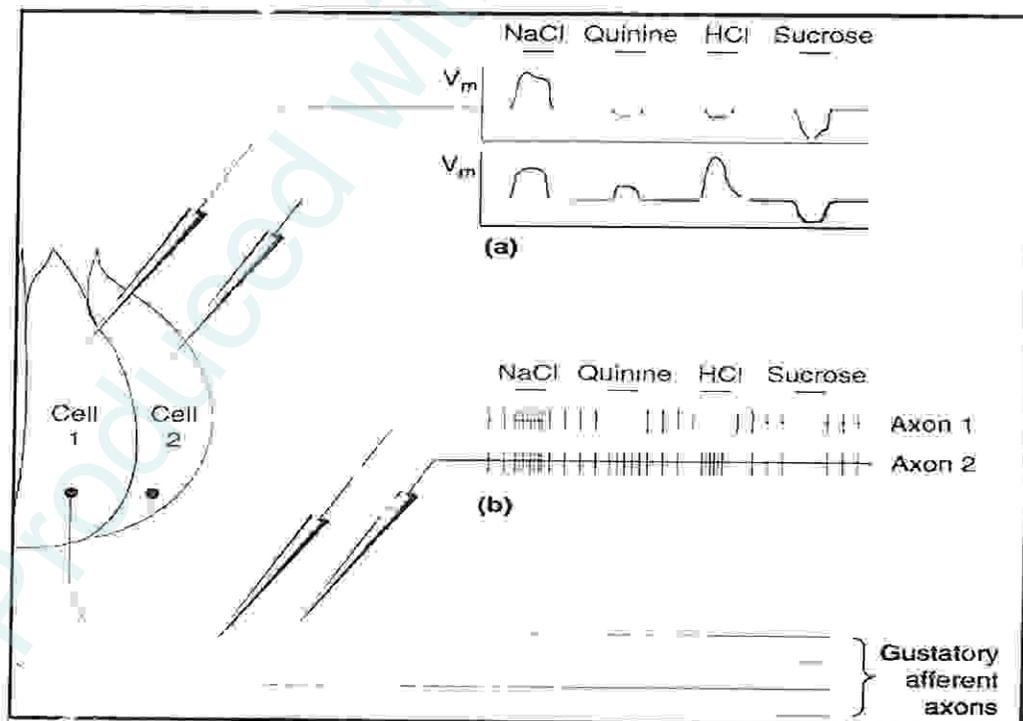


Figure 11: la transduction du signal chimique en signal électrique au niveau des bourgeons gustatifs [24]

7.3. Les voies et les centres gustatives

Les papilles fongiformes des deux tiers antérieurs de la langue sont innervées par la corde du tympan. Les fibres de la corde du tympan voyagent avec les fibres du nerf V qui assure la sensibilité somesthésique des mêmes deux tiers antérieurs de la langue. Les fibres du V ne pénètrent pas dans le bourgeon du goût et n'innervent pas les cellules gustatives.

Les quelques papilles caliciformes, logées dans la partie postérieure de la langue, sont arrangées selon une forme géométrique dite en « V ». Elles sont innervées par le nerf IX ou glossopharyngien. Ce nerf véhicule les sensibilités chimiques (gustatives) et somesthésique (mécanique et thermique).

Les papilles foliées, quant à elles, présentent une double innervation de la corde du tympan et du glossopharyngien.

Les corps cellulaires des neurones gustatifs de la corde du tympan sont rassemblés dans le ganglion géniculé, les corps cellulaires du nerf trijumeau dans le ganglion trigéminal ou ganglion de Gasser, les corps cellulaires des neurones du glossopharyngien sont localisés dans le ganglion pétreux. [22]

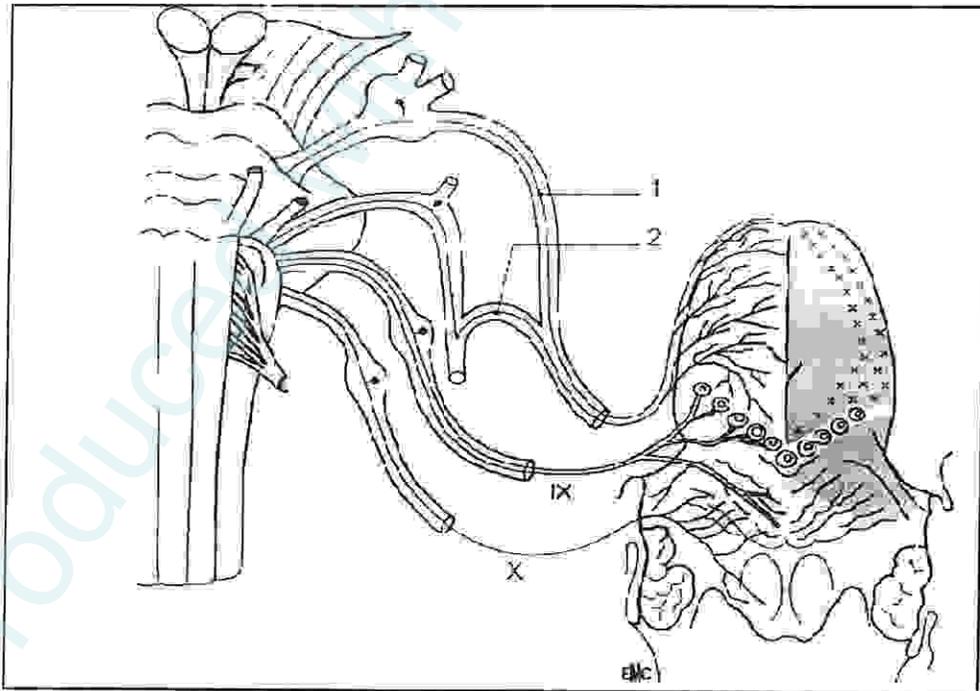


Figure 12: Voies gustatives périphériques [21]

- 1. Nerf lingual
- 2. Corde du tympan.
- IX nerf glossopharyngien,
- X pour le nerf pneumogastrique ou nerf vague

Les signaux émis par les récepteurs gustatifs sont véhiculés jusqu'au système nerveux central, où des régions du cerveau décodent l'information chimique et la traduit en sensation gustative. Il importe également de remarquer que la vue et l'odorat participent également, de façon indirecte, à l'élaboration du goût. [23]

Produced with ScanTOPDF

Chapitre II :

les capteurs électroniques

Produced with ScantOPDF

1. Le nez électronique

1.1. Analyse des odeurs

Il existe actuellement une forte demande d'actions de recherche dans le domaine de la caractérisation des matières premières et des aliments. Souvent initiée par les consommateurs, cette demande a été relayée par les filières agroalimentaires. Si la qualité d'un produit alimentaire dépend en premier lieu de caractéristiques physiques, chimiques, nutritionnelles ou encore bactériologiques, les produits doivent répondre également aux attentes sensorielles des consommateurs. Parmi les aspects sensoriels, la dimension olfactive joue un rôle important et rend le contrôle de l'odeur, à travers l'étude des composés volatils, primordial pour l'évaluation de la qualité des produits. Les techniques classiques permettant de caractériser la dimension olfactive des produits sont, d'une part, l'analyse sensorielle et, d'autre part, l'analyse chimique. Cette première partie est consacrée à l'exposé de l'état de l'art de ces deux techniques. [22]

1.1.1. Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle est un outil puissant employé en industrie agroalimentaire, outre l'analyse chimique, pour évaluer la qualité d'un produit. L'évaluation sensorielle est une méthode qui consiste à décrire l'ensemble des caractéristiques organoleptiques du produit agroalimentaire, grâce à un panel d'experts entraînés à cette tâche. Pour la description sensorielle des produits, le panel définit un ensemble de descripteurs rigoureusement choisis pour leur pertinence et assortis chacun d'une note. L'ensemble des descripteurs ainsi mis au point et quantifiés constitue le profil sensoriel du produit (SSHA, 1998). Grâce à leurs profils, les produits peuvent être positionnés les uns par rapport aux autres. Les profils sensoriels peuvent également être corrélés à des données consommateurs dans le but par exemple de traduire l'acceptation ou le rejet du consommateur face au produit ou à des données instrumentales dans le but par exemple de relier les caractéristiques physico-chimiques du produit à son profil sensoriel.

Deux types de mesure peuvent être effectués : la mesure d'intensité odorante et la mesure de concentration-odeur. Les deux méthodes sont fondées sur des approches complètement différentes et les résultats qu'elles procurent ne sont pas équivalents. [22]

a. Mesure d'intensité odorante

La psychophysique est la branche de la psychologie qui décrit de manière quantitative la relation existant entre un stimulus physique et la réponse psychologique qu'il induit. En olfaction, la mesure d'intensité odorante vise à quantifier l'intensité perçue en fonction de la concentration du stimulus. Il s'agit donc d'une évaluation psychophysique. Dans ce type de mesure il y a plusieurs méthodes :

- Méthode des catégories
- Méthode d'évaluation directe
- Méthode d'équivalence avec une autre modalité sensorielle
- Méthode d'équivalences olfactives [7]

b. Mesure de concentration-odeur

Le deuxième type d'analyse sensorielle est la mesure de concentration-odeur. Cette méthode, également connue sous le nom de technique de dilution au seuil de détection, consiste à déterminer le nombre de dilutions (Z_{50}) requises pour atteindre le seuil de détection olfactif d'un échantillon odorant, le seuil de détection est généralement défini par une réponse positive à la perception d'une odeur par 50% des membres du jury.

Cependant, la mise en place d'un jury d'experts demande un travail considérable avant d'effectuer des évaluations fiables et objectives. Le recrutement et l'entraînement du groupe de panelistes représentent un investissement long et coûteux. De plus, les performances des panelistes peuvent être affectées par différents facteurs externes tels que la maladie, le stress, etc. Toutefois, l'analyse sensorielle reste actuellement la méthode de choix couramment employée en industrie agroalimentaire, pour l'analyse des odeurs. [22]

1.1.2. Analyses physico-chimiques

L'analyse chimique des arômes alimentaires fait le plus souvent appel à une séparation des molécules volatiles par chromatographie en phase gazeuse, couplée soit à la spectrométrie de masse, soit à l'olfactométrie. [22]

1.2. Le nez à capteurs de gaz

Des 5 sens, l'odorat a toujours été le plus difficile à cerner. L'odeur d'un aliment contient de substances chimiques qui lui donnent un caractère et des qualités uniques.

La capacité à mesurer et à identifier efficacement le développement optimal de l'arôme est par conséquent un point crucial dans la fabrication de nombreux produits.

Traditionnellement, cette tâche difficile a été la prérogative des « nez » dont le jugement individuel inclura toujours une part d'appréciation personnelle. Des techniques analytiques sont parfois utilisées mais il est souvent difficile de combiner ces données avec les informations sensorielles ; par ailleurs, les coûts de ces opérations sont élevés.

Au contraire, les mesures effectuées par le nez électronique sont objectives, reproductibles, très fiables et relativement peu chères. Leur interprétation est simple, rapide et en temps réel. [11]

Comme l'odorat humain, le nez électronique apprend par expérience et améliore ses capacités au fur et à mesure de son utilisation. Il est conçu pour analyser, reconnaître et identifier les substances chimiques volatiles à des concentrations très faibles (ppb-ppm). [11]

Les premiers travaux portant sur le développement d'un appareil spécifiquement destiné à la mesure des odeurs remontent aux années 60. Le terme nez électronique n'est cependant apparu dans la littérature qu'une vingtaine d'années plus tard suite aux recherches menées à l'université de Warwick en Grande Bretagne par le groupe de Dodd et Persaud.

Pratiquement cette technique a vu le jour au début des années 90, grâce aux différents progrès enregistrés dans l'informatique, dans l'électronique et dans les capteurs de gaz. Les nez ont été fabriqués dans le but, soit de remplacer l'analyse sensorielle, soit de l'assister. [22]

Un nez électronique ou nez artificiel, associe une série de capteurs chimiques non-spécifiques à un système automatisé de reconnaissance permettant l'interprétation des réponses des capteurs (voir figure 2.2). L'appellation nez électronique s'explique par l'analogie existant entre ce type d'appareil de mesure et le système olfactif humain, les capteurs chimiques jouant le rôle des neurorécepteurs olfactifs et le système de traitement de l'information pouvant être associé au cerveau olfactif. [23]

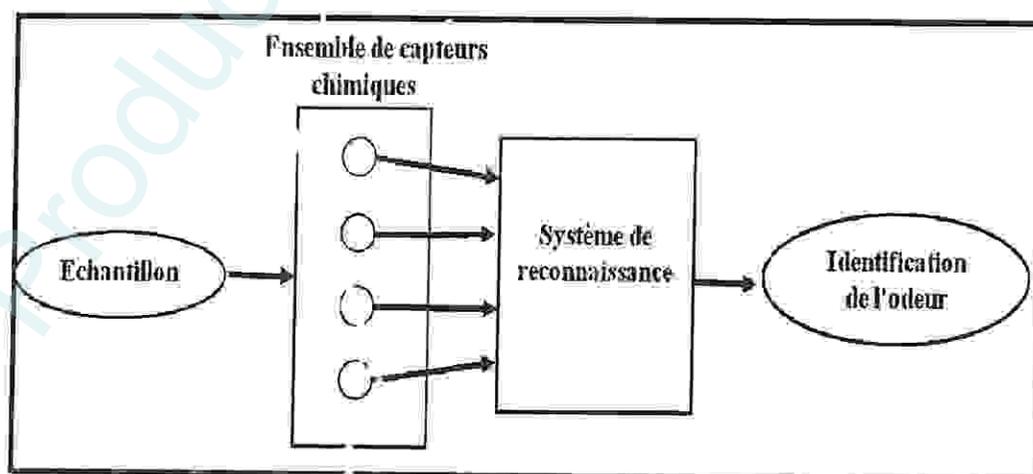


Figure 13: Schéma de principe du nez électronique [23]

Le principe de fonctionnement du nez électronique repose sur l'utilisation de plusieurs capteurs non-sélectifs qui réagissent en présence de composés volatils, formant ainsi une empreinte caractéristique du mélange odorant à l'étude. Le rôle du système de reconnaissance est de relier cette empreinte électronique à une odeur donnée, suite à un traitement mathématique préalablement implanté sur un microprocesseur. Selon les applications, il est alors possible d'identifier, de détecter ou encore de discriminer différentes odeurs. [9]

1.2.1. Principe général des analyses par le nez électronique

Un nez électronique est un instrument qui permet la capture des COV (Composés Organiques Volatils) afin de constituer et d'analyser leur empreinte olfactive. Contrairement aux techniques chromatographiques, le nez électronique ne sépare pas les composés avant leur détection. C'est pour cela que l'on parle d'« empreinte » et que le temps d'analyse est très court.

Les modes de détection (capteurs chimiques, spectrométrie de masse), couplés à des logiciels spécifiques, permettent d'apporter rapidement une information qualitative et/ou quantitative sur la composition de l'échantillon analysé.

Le nez électronique est conçu sur le même principe que le nez humain. De multiples récepteurs spécifiques et codés en intensité forment une empreinte. Cette empreinte du profil aromatique est comparée à celle déjà acquise lors d'une phase d'apprentissage préalable indispensable.

En effet, sans référence, une empreinte reste sans signification. Un logiciel adapté permet enfin de réaliser une reconnaissance.

Un nez électronique n'est pas un nez humain dans la mesure où :

Le nez électronique ne reconnaît pas des odeurs, mais des COV

Les COV sont souvent corrélés à des odeurs, ce qui permet d'obtenir des résultats traduits dans le vocabulaire sensoriel humain

Un échantillon dépourvu d'odeur pour un nez humain peut être reconnu par un nez électronique car il est sensible à toutes les molécules organiques volatiles, qu'elles soient odorantes ou non. Inversement, mais plus rare, une odeur peut ne pas provoquer de réponses spécifiques sur un nez électronique si elle n'est pas causée par un COV ou si le système de détection n'y est pas sensible. [23]

Nous pouvons facilement comparer le principe du nez électronique à celui de la perception humaine.

1.2.2. Les principales étapes de la reconnaissance olfactive

Le chauffage de l'échantillon pendant un temps défini génère "l'odeur".

La phase gazeuse est prélevée, puis transférée à un système de détection qui réagit à la présence de diverses molécules.

La différence de réaction des capteurs est enregistrée à l'aide de modèles statistiques permettant de classer les odeurs. À partir de ces modèles et des évaluations humaines (apprentissage provenant des panels sensoriels), le système établit des prévisions les plus proches possibles de celles de l'homme par comparaison avec le modèle statistique.

Le nez électronique peut donner une réponse simple telle que "reconnu", "bon", ou "mauvais" comme une réponse plus sophistiquée telle que l'intensité d'une odeur ou la concentration d'une molécule. La terminologie peut être simple et qualitative, ou plus spécifique et quantitative.

2. La langue électronique

Le terme "langue électronique" a été inventé lors de la Conférence "EuroSensors" en 1996 à Louvain, en Belgique, pour un concept développé dans le cadre d'une collaboration de recherche italo-russe. Le concept a été développé, et un grand nombre d'applications ont été étudiées.

Les premières langues électroniques se composaient de réseaux de capteurs potentiométriques de deux catégories générales: celles classiques tels que le pH, électrodes sélectives de sodium, de potassium, et des électrodes spécialement conçus sur la base de chalcogénure matériaux vitreux. Ces langues électroniques ont été utilisées pour la reconnaissance de différents types de thé, boissons gazeuses, jus de fruits, et de bières. Surveillance de la pollution des eaux du fleuve à l'aide de ces systèmes. La langue électronique est un instrument qui mesure et compare des goûts. [15]

Les composés chimiques responsables du goût sont perçus par les récepteurs gustatifs humains, et de façon similaire les capteurs de la langue électronique détectent les mêmes composés organiques et inorganiques dissous dans les liquides et responsables du goût. Comme les récepteurs humains, chaque capteur réagit à un spectre de composés qui lui est propre. L'information apportée par tous les capteurs est complémentaire et la combinaison

de tous les capteurs génère une empreinte gustative unique. La plupart des seuils de détection des capteurs sont similaires ou même meilleurs que ceux des récepteurs humains. [23]

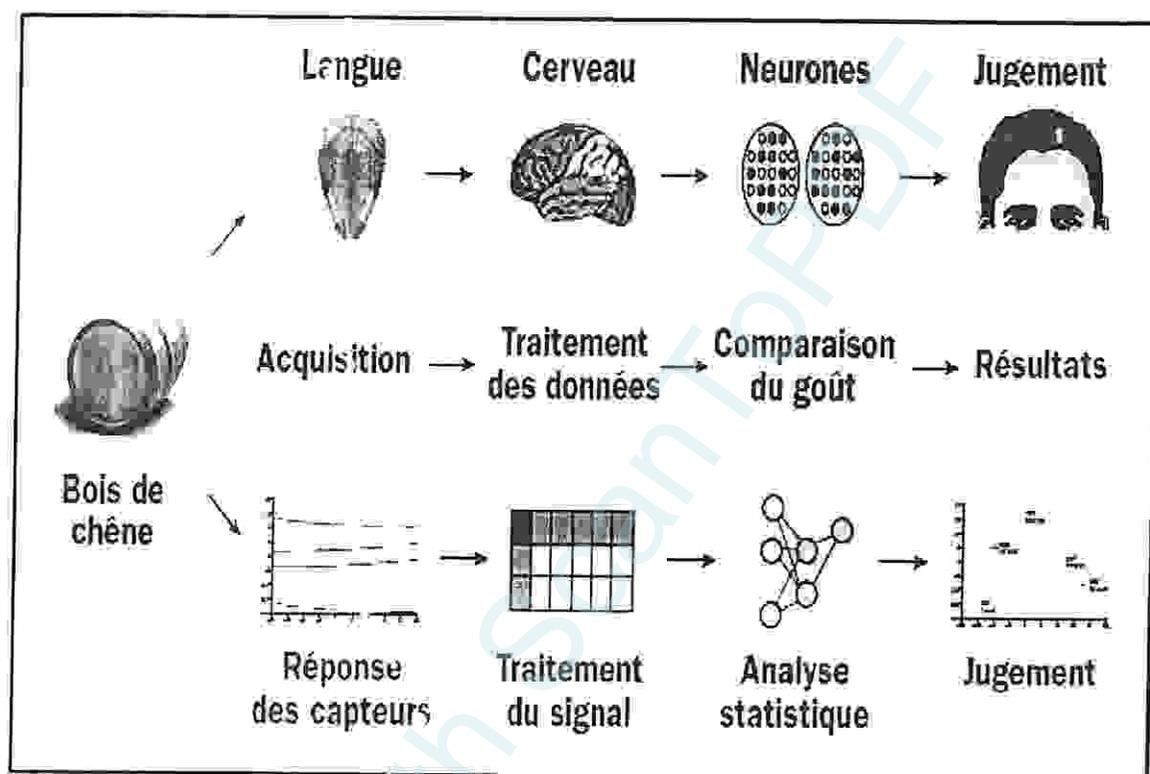


Figure 14: principe de la langue électronique [17]

Le fonctionnement d'une langue électronique est pratiquement identique à celle d'un nez électronique. La différence la plus importante est que le moyen de détection est généralement liquide, et les molécules à détecter sont de type différent (procédés chimiques variant). Et, outre, les systèmes sont très similaires, il ne faut pas entrer dans les détails dans cette section. En outre, le fait que le goût est moins puissant que l'odeur fait le plus grand intérêt à se concentrer sur celui-ci.

Bien sûr, la recherche et le développement des langues électroniques est désormais très vaste. Les groupes qui ont traditionnellement travaillé dans le domaine des capteurs et des systèmes de traitement des données sont les grandes lignes ouvertes de développement dans ce domaine. Les types les plus courants de capteurs sont électrochimiques, y compris Potentiométriques et volt-ampérométrique. Les capteurs électrochimiques offrent une grande polyvalence, capable de détecter des espèces moléculaires et aussi des ions. Actuellement sur le marché de plusieurs instruments qui agissent comme des langues électroniques. Les

applications sont aussi les pareils à le nez électronique, centrée dans les milieux liquides. Par exemple, l'expérience de la classification des eaux minérales

Les étapes d'analyse des liquides par la langue électronique comprennent les mesures fournies par une série de capteurs suivies du traitement statistique de ces signaux et comparaison avec des standards déjà référencés. Ce système imite le fonctionnement de la réponse gustative humaine (figure 2.3). Par exemple la réponse d'une solution de chlorhydrate de quinine peut être mémorisée comme le standard du goût amer. Par la suite, le profil des signaux d'une nouvelle solution est comparé au profil standard du goût amer. Le procédé de calibration de la langue électronique est équivalent à l'entraînement d'un dégustateur. [17]

Les capteurs, généralement utilisés pour ce type d'analyse, sont des capteurs potentiométriques, bien que d'autres principes, comme la voltamétrie, conductimétrie ou la mesure de fréquence peuvent être appliqués.

Contrairement au principe d'une électrode à ion sélectif et dont le signal dépend de sa concentration (pH mètre, électrode à sodium, etc.), le signal des capteurs de la langue électronique dépend de plusieurs substances présentes dans le milieu liquide. Dans ce cas, la large sélectivité (« sélectivité croisée »), ainsi que la sensibilité, la bonne répétabilité et la stabilité du signal sont les critères de choix pour les capteurs de la langue électronique.

Différents types de capteurs respectant ces critères ont été testés : verres chalcogénides, membranes organiques, etc... Les capteurs utilisés ont permis de caractériser des solutions possédant de très faibles concentrations des substances. Le seuil de perception de la langue électronique est environ 100 fois plus faible que la perception humaine selon le type de goût. [17]

Depuis une décennie, nous assistons au développement croissant de systèmes de détection de gaz utilisant des capteurs. Cette dynamique est liée en tout premier lieu à la forte demande de secteurs aussi importants et variés que l'environnement, l'agroalimentaire, le génie biologique et le médical, le génie des procédés industriels et la sécurité civile et militaire.

Nous nous proposons dans ce chapitre de définir et d'énumérer les différents capteurs chimiques à l'aide de quelques exemples : capteurs « semi-conducteurs », capteurs « Potentiométriques », capteurs « catalytiques » ou encore capteurs à « fibre optique ». Nous présenterons ensuite quelques types des capteurs utilisés dans le nez et la langue électronique.

3. Les capteurs chimiques

Les instruments classiques d'analyse pour la détection d'une espèce (bio) chimique sont généralement complexes, coûteux, volumineux et souvent difficiles à mettre en œuvre.

De plus, les phases de préparation des échantillons, d'incubation, et d'exploitation des résultats augmentent souvent très fortement la durée totale d'analyse.

La détection d'une espèce chimique ou biochimique ainsi que l'évaluation de sa quantité – ou de sa concentration – peuvent être faites soit à l'aide d'instruments d'analyse tels que les chromatographes ou les divers spectromètres, soit à l'aide de capteurs. [16]

3.1. Capteurs chimiques de gaz

3.1.1. Définition

La fonction intrinsèque d'un capteur chimique est basée sur la reconnaissance dans son environnement immédiat d'une espèce chimique particulière en interférence avec une couche sensible. Cette reconnaissance s'accompagne d'une modification des propriétés physico-chimiques de la couche sensible qui, par un procédé de transduction, génère un signal électrique, optique, mécanique ou thermique.

Par opposition aux méthodes classiques d'analyse, communément rencontrées dans les laboratoires de chimie analytique, ces systèmes sont destinés à faire des mesures sur site et doivent ainsi répondre à des exigences de miniaturisation, d'autonomie, de portabilité et surtout de simplicité d'utilisation. En fonction de l'application particulière à laquelle nous le destinons, le capteur sera également soumis à des contraintes de sensibilité, de sélectivité, de temps de réponse et de coût de fabrication qui devront être prises en considération dès les premières étapes de sa conception. [5]

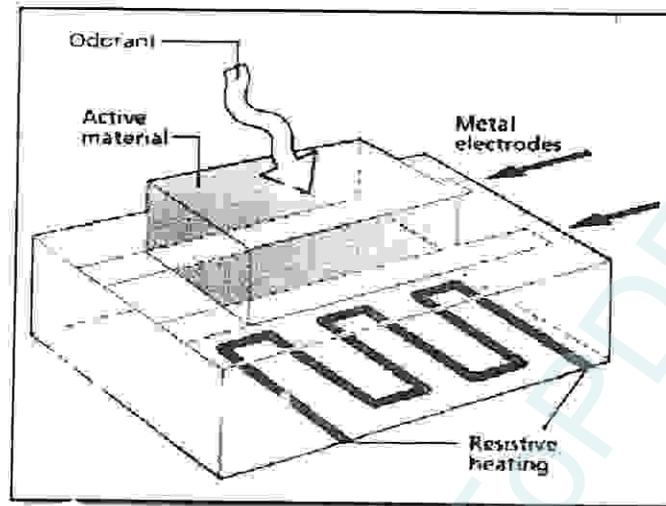


Figure 15: schéma du capteur de gaz [4]

3.1.2. Principe et fonctionnement

D'une façon générale, un capteur est constitué d'un élément sensible, capable d'initier un signal, et d'un transducteur qui assure l'exploitation de ce signal (Figure I.1). L'acte élémentaire sur lequel repose son fonctionnement est la reconnaissance de la grandeur à analyser (mesurande). Cette reconnaissance se produit au sein d'une couche que l'on appellera « couche sensible », et se traduit généralement par la modification d'une propriété physique de cette couche. Cette modification est détectée puis convertie en un signal électrique directement analysable, grâce au « transducteur ». Enfin, le signal transmis est analysé et transformé en une information simple pour l'utilisateur (tension ou courant). Outre ces trois fonctions : Reconnaissance, Transduction et Analyse, nécessairement présentes dans tout capteur, une fonction d'amplification est utile pour accroître la sensibilité du capteur. Cette amplification peut être obtenue en amont du transducteur, par un mécanisme chimique ou biochimique (catalyse) ou bien en aval, grâce à un dispositif électronique. [5]

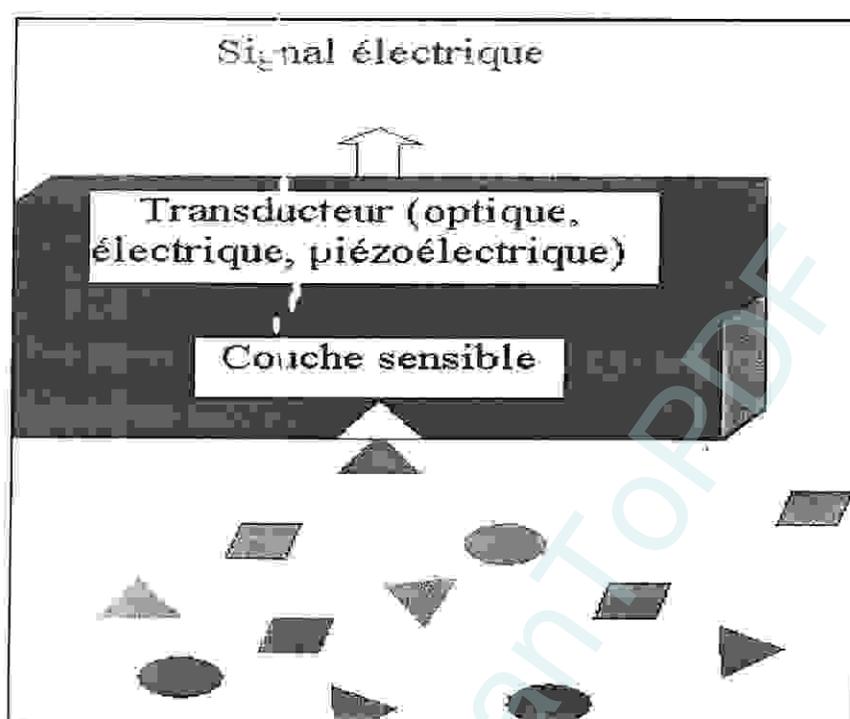


Figure 16: Schéma de principe de capteurs chimique [5]

3.1.3. Une grande variété de capteurs chimiques gazeux

Dans la dernière décennie, la littérature scientifique se rapportant au thème des capteurs chimiques a été particulièrement féconde. Ainsi, de très nombreux capteurs, s'appuyant sur différents principes de la physique, ont été étudiés et il devient difficile d'établir une liste exhaustive. Cependant, il est possible de regrouper et classer les familles de capteurs suivant la nature du mécanisme de transduction. Les transducteurs les plus fréquemment proposés se répartissent en quatre grandes classes, selon que leur principe repose sur des phénomènes « électriques, électrochimiques, thermiques ou optiques ». [5]

3.1.3.1. Électrique : capteurs de type semi-conducteur

Les capteurs à oxydes semi-conducteurs utilisent les variations de résistance de certains matériaux en présence de gaz spécifiques. Le choix du matériau dépend en particulier de la nature du gaz à détecter. Le cas le plus généralement rencontré est celui de la détection de gaz réducteurs (CO , CH_4 , H_2 , hydrocarbures...) dans l'air, donc en milieu oxydant. Pour cela, les oxydes métalliques à caractères semi-conducteurs constituent des matériaux bien adaptés. En effet, ils ne présentent pas une résistance électrique trop grande pour que l'on puisse effectivement mesurer des conductivités électriques avec de l'instrumentation classique. Les oxydes métalliques semi-conducteurs de type n, dans lesquels les porteurs majoritaires sont des électrons, peuvent être utilisés : l'adsorption d'un gaz réducteur, donneur

d'électrons, conduit alors à une augmentation de la conductivité électrique (diminution de la résistance). Inversement, un semi-conducteur de type p sera utilisé pour la détection d'un gaz oxydant.

Les premiers brevets concernant ces matériaux ont été déposés en 1962 au Japon par Seiyama (ZnO , oxyde de zinc) et par Tagushi (SnO_2 , dioxyde d'étain). Leur exploitation a conduit à l'apparition du premier capteur semi-conducteur TGS à base de SnO_2 commercialisé en 1968 par la société Figaro, destiné à la détection des fuites de gaz domestiques.

Ces capteurs, qui ont des temps de réponse inférieur à 10s, sont capables de détecter des concentrations entre 0 et 1%. Egalement très sensibles, ils présentent cependant une faible sélectivité et sont sensibles à l'humidité. [5]

3.1.3.2. Electrochimique : capteurs de type Potentiométriques

Dans ce cas ce sont les propriétés de transport de charges électriques de certains matériaux appelés électrolytes solides qui sont utilisées. Par opposition aux matériaux semi-conducteurs qui possèdent une conductivité électronique, avec ce type de capteur le transport est assuré par la migration d'ions (conduction ionique) ou de façon plus générale par des défauts ponctuels. Une modification de la concentration de l'espèce mobile à la surface du matériau (par exemple une consommation d'oxygène par un oxyde), provoque le déplacement des charges établissant un champ électrique entre la surface et le volume de l'électrolyte solide. Si les modifications ne peuvent pas agir sur l'ensemble de la surface de l'échantillon il en découle une dissymétrie qui se traduit par une force électromotrice issue de la loi de Nernst, image de la concentration du gaz. Ce mécanisme de transduction a été particulièrement utilisé pour les sondes à oxygène dans des applications automobiles.

L'exemple le plus connu est la sonde à oxygène Lambda commercialisée par la société Bosch. Le système est constitué de deux cellules gazeuses séparées de façon étanche par un oxyde métallique utilisé comme électrolyte solide.

Si l'on fixe la pression partielle d'oxygène dans un compartiment, il est alors possible de mesurer la pression partielle d'oxygène dans l'autre compartiment. Ce système permet de mesurer in situ des concentrations entre 0 et 25%, avec un temps de réponse inférieur à 5s, et offre une grande durée de vie. [5]

3.1.3.3. Thermique : capteurs de type catalytique

Les capteurs de type catalytique, appelés souvent « pellistors », sont des calorimètres miniatures utilisés pour mesurer l'énergie libérée lors de la combustion d'un gaz inflammable. Dans ce cas, le caractère exothermique du craquage d'un gaz au contact d'un catalyseur est directement utilisé. L'élément sensible est constitué d'un oxyde à grande surface spécifique supportant un catalyseur métallique et dans lequel est noyé un fil de platine. Ce fil a deux usages : d'une part, il sert à chauffer l'oxyde à la température de travail appropriée (entre 500 et 800°C) et d'autre part, il constitue le transducteur puisqu'il permet de mesurer les changements de températures (mesure de la résistance électrique) provoqués par l'oxydation

Des gaz inflammables. A noter toutefois que ces détecteurs nécessitent la présence d'oxygène et qu'ils ne permettent pas la détection de gaz dans des milieux non oxydants tels que l'azote pur par exemple. Ces capteurs sont utilisés pour la détection d'hydrocarbures dans l'air, en particulier le méthane mais également pour d'autres gaz (C_4H_{10} , H_2 , CH_3OH , NH_3).

3.1.3.4. Optique : capteurs à fibres optiques

Le développement de ces capteurs découle des études qui ont été effectuées pour les télécommunications par fibre optique. L'amélioration au cours des vingt dernières années des performances des fibres optiques et des composants d'extrémité offre des solutions intéressantes pour la détection d'espèces chimiques. Nous pouvons distinguer deux types de capteurs à fibre optique : les intrinsèques et les extrinsèques. [5]

3.1.4. Caractéristiques générales

Les performances des capteurs sont très souvent explicitées par ce que nous appelons communément « la règle des 3 S », à savoir : Sensibilité, Sélectivité et Stabilité.

3.1.4.1. Sensibilité

Par définition, la sensibilité détermine l'évolution, en un point donné, de la grandeur de sortie (X), le plus souvent électrique, en fonction de la variable mesurée. Suivant la variété des capteurs, de nombreuses quantités peuvent représenter le signal de sortie. Dans le cas des capteurs chimiques basés sur la variation de résistance en fonction du changement de concentration d'espèces gazeuses, il est possible d'utiliser pour le signal de sortie soit : R (résistance), R/R_0 (résistance relative) ou $(R-R_0)/R_0$ (variation relative de résistance).

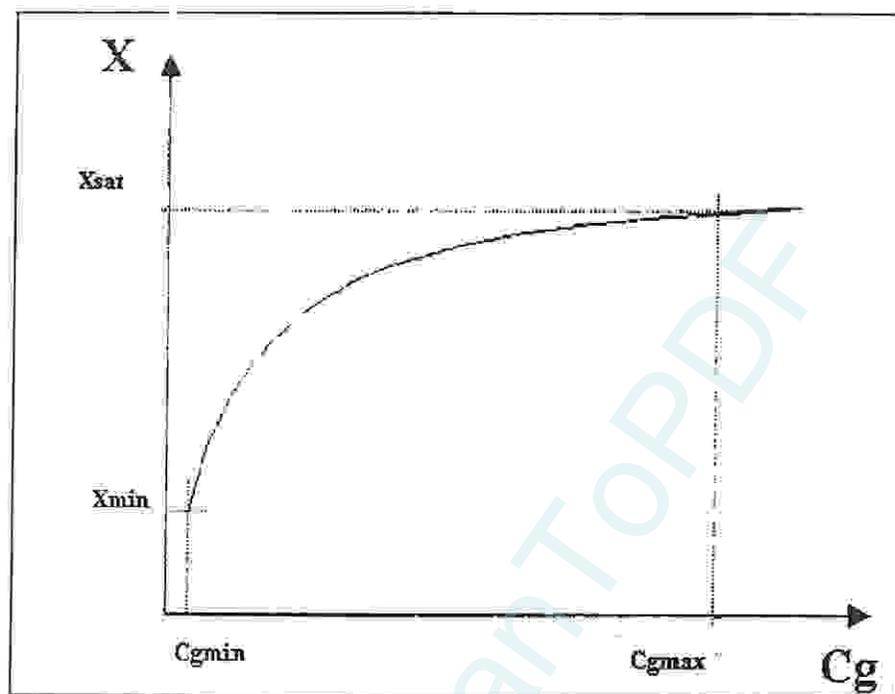


Figure 17: Exemple de courbe de réponse d'un capteur :
Signal de sortie en fonction de la concentration [5]

La sensibilité du capteur est déterminée en calculant la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur. Pour une petite variation plus la sensibilité sera élevée, plus la limite de détection, liée au bruit de mesure et à la sensibilité, sera faible.

3.1.4.2. Sélectivité

Par définition, la sélectivité est l'aptitude d'un capteur à répondre à seulement une espèce en présence de beaucoup d'autres. Le manque de sélectivité constitue la grande limitation actuelle des microcapteurs chimiques : en effet, la majorité des capteurs ne permettent qu'une sélectivité partielle. Le capteur pourra détecter un gaz de façon préférentielle par rapport à un autre (ou une famille d'autres gaz) mais ce dernier présentera toujours une réponse plus ou moins importante. [5]

3.1.4.3. Stabilité

La stabilité conditionne tout le traitement de l'information possible en aval du capteur. Il faudra donc toujours vérifier que le signal ne dérive pas dans le temps afin que le traitement de l'information soit correct.

Fort de ces trois paramètres, nous pouvons en ajouter un dernier tout aussi important, qui est le caractère réversible du capteur. Ce dernier lui confère la possibilité d'un retour vers

L'état initial = la réponse du capteur ne dépend pas des événements qui ont pu se produire antérieurement.

Les nez électroniques et les langues électroniques sont les appellations communes des capteurs répondant aux saveurs / aux odeurs (volatils) ou au goût (solubles), par l'utilisation d'un réseau de capteurs simples et non spécifiques et d'un progiciel de reconnaissance des formes. [5]

3.1.5. Les capteurs du gaz utilisés dans le nez électronique

Il existe plusieurs types de capteurs pouvant être utilisés dans les nez électroniques (voir la liste présentée au tableau 1.2). Le nombre de capteurs employés dans les nez commerciaux varie typiquement d'un seul capteur à quelques dizaines de capteurs (30-40).

Certains nez électroniques permettent la combinaison de différentes technologies de capteurs au sein du même instrument. Parmi les technologies trois d'entre-elles sont utilisées de façon répandue (oxydes métalliques, polymères conducteurs et acoustiques) et elles seront donc détaillées dans les lignes qui suivent. Pour ce qui est des autres types de capteurs, soit ils sont en phase de développement, soit leur utilisation est encore restreinte. [23]

Tableau 03: les principaux capteurs utilisés dans le nez électronique [23]

<i>Type de capteurs</i>	<i>Principe d'opération</i>
Oxydes métalliques	Conductivité électrique
Polymères conducteurs	Conductivité électrique
Acoustiques	Piézo-électricité
Calorimétriques	Conductivité thermique
Optiques	Fluorescence, chimiluminescence
Electro-chimiques	Conductivité électrique
MOSFET	Conductivité électrique

On peut classer ces capteurs en deux catégories selon la température dans laquelle ils fonctionnent; les capteurs chauds fonctionnant à des températures allant de 175 à 450°C, et les capteurs froids fonctionnant à des températures inférieures à 50°C. Parmi les capteurs chauds :

Ce sont les **oxydes métalliques conducteurs (MOS)** qui sont les plus répandus car ils sont sensibles à une large gamme de vapeurs organiques (Strike et al., 1999). Ce sont des capteurs formés d'un support en céramique chauffé et revêtu d'un film d'oxydes métalliques semi-conducteur à base d'oxyde de zinc ou d'oxyde d'étain dopés à divers métaux (palladium, platine, etc.). Chaque combinaison oxyde/dopant apporte une sensibilité différente: certains sont plus sensibles aux aldéhydes, d'autres aux composés soufrés, etc. Le principe est le suivant : dans une atmosphère dotée d'oxygène (air ambiant), les molécules de dioxygène adsorbées à la surface, attirent les électrons de la bande de conductivité du capteur : il en résulte une faible conductivité. Si, par la suite, des molécules volatiles se mettent en contact du capteur, alors un transfert de charge s'opère entre les composés volatils et l'oxygène adsorbé à la surface du capteur. Il en résulte une augmentation de la conductivité du capteur, augmentation qui fonde la mesure. Ces capteurs sont relativement peu sensibles à l'humidité. Cependant, les MOS sont sensibles à l'éthanol et, dans le cas de l'analyse de boissons alcoolisées, cela peut masquer les autres composés volatils d'intérêt. De plus, lors de leur utilisation, des effets mémoires dus aux adsorptions irréversibles, surtout vis-à-vis de composés soufrés et des acides faibles, ont été constatés.

Enfin, les hautes températures requises par les MOS rendent leur utilisation inappropriée dans des environnements contenant des produits chimiques potentiellement inflammables. [23]

Le temps de réponse du capteur est compris entre quelques secondes et quelques minutes. Le principal inconvénient concerne la nécessité de réétalonnage fréquent du capteur. C'est un capteur peu coûteux. [12]

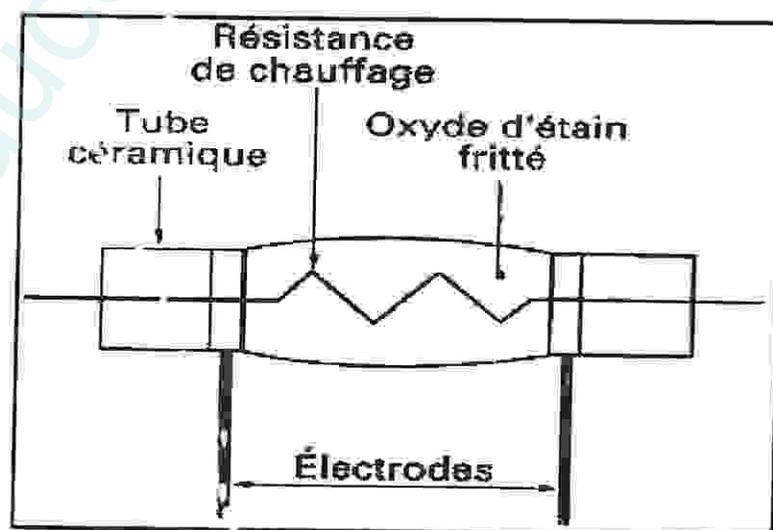


Figure 18: Schéma d'un capteur à oxyde métallique semi-conducteur [16]

Parmi les capteurs froids, ce sont les **polymères conducteurs** (PCond) qui sont les plus largement employés car comme les MOS, ils sont sensibles à une large gamme de vapeurs organiques. Les PCond sont obtenus par déposition électrochimique d'un polymère (polypyrrole ou polyaniline) entre deux électrodes plaquées d'or. [23]

Les polymères conducteurs sont des macromolécules générées par la polymérisation (chimique ou électrochimique) de monomères. Ces monomères sont généralement des molécules aromatiques non-conductrices, telles que pyrrole, aniline et thiophène. La polymérisation confère au polymère des propriétés de semi-conducteur. Des agents dopants sont parfois utilisés pour modifier les caractéristiques du polymère.

Le principe de fonctionnement est basé sur l'interaction entre les molécules odorantes et les chaînes polymériques qui affecte le transfert des électrons, donnant ainsi lieu à un changement de conductivité pouvant être mesuré. L'utilisation de ce type de capteur pose des problèmes liés à leur sensibilité à l'humidité.

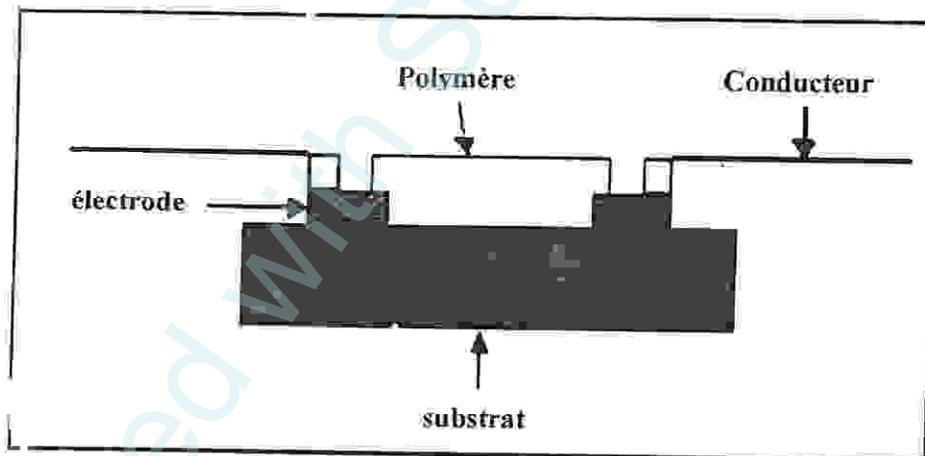


Figure 19: Capteur par polymère conducteur [16]

Les capteurs acoustiques : (Microbalance à cristal de balance). Les capteurs acoustiques sont basés sur l'utilisation de matériaux ayant des propriétés piézo-électriques que l'on recouvre d'une mince couche polymère.

Le phénomène de piézoélectricité se manifeste par l'apparition d'une polarisation électrique dans certains matériaux diélectriques anisotropes (absence de centre de symétrie dans la maille cristalline) lorsqu'ils sont déformés sous l'effet d'une force de direction convenable. Si l'on constitue un condensateur en déposant une paire d'armatures sur les faces opposées d'une lame piézoélectrique, il apparaît, sous l'influence d'une force, des charges de signes contraires sur les armatures opposées et donc une différence de potentiel.

proportionnelle à la force appliquée. Un tel dispositif permet la mesure des forces et de toute grandeur physique susceptible de s'y ramener : pression, accélération, vibrations. L'effet piézoélectrique est réversible : soumis à un champ électrique, de direction convenable, un matériau piézoélectrique se déforme ; il peut en particulier être excité à sa résonance mécanique, qui est aiguë. Cette propriété trouve application dans des capteurs piézoélectriques utilisant le quartz dont la résonance se produit à une fréquence sensible à différentes grandeurs physiques (température, pression) qui peuvent être mesurées avec le capteur ainsi constitué. [23]

Les molécules odorantes sont absorbées/adsorbées dans le polymère, causant une variation de la masse du capteur, ce qui induit un changement mesurable de la fréquence de résonance du capteur. Il existe deux types de capteurs acoustiques employés dans les nez électroniques : les « bulk acoustic wave » et les « surface acoustic wave ». Dans le premier cas, l'oscillation se propage à travers le volume du capteur alors que dans le deuxième cas, seule sa surface est affectée, mais à une fréquence beaucoup plus élevée (centaines de MHz vs 10 MHz). [23]

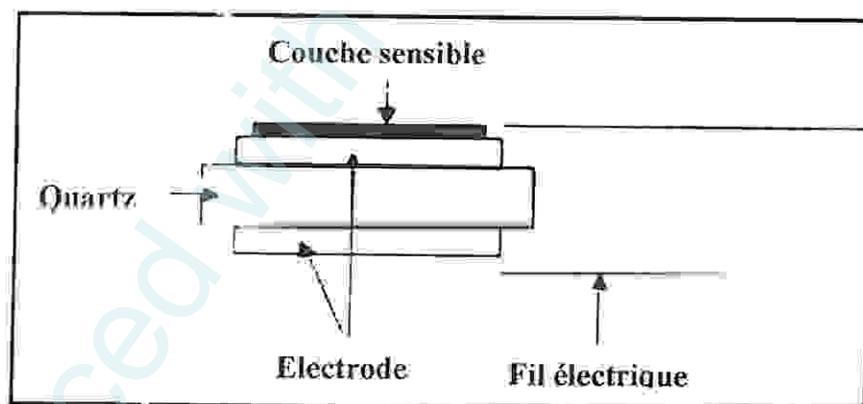


Figure 20: Microbalance à cristal de quartz (capteur acoustique) [16]

La microbalance à quartz : est constituée d'une lame de quartz taillée sous l'angle cristallographique approprié (taille AT) ; sur les deux faces de cette lame sont déposées des électrodes circulaires en or entre lesquelles est appliquée une tension alternative. La fréquence de résonance du quartz va être modifiée par le dépôt d'une espèce chimique sur une des électrodes, le décalage relatif de la résonance en fréquence dépend de la masse de ce dépôt suivant la loi de Sauerbrey ; la masse du film par unité de surface, m_f , s'écrit :

$$n_f = - \frac{(f_c - f_q) \rho_q V_q}{2 f_q^2}$$

f_q étant la fréquence propre de résonance de la lame de quartz, ρ_q sa masse volumique, v_q la vitesse de cisaillement de l'onde mécanique et f_c la fréquence de résonance en présence du dépôt. Cette formule peut être présentée sous la forme : $\Delta f = -C_f m_f$

Δf étant la variation de fréquence de résonance induite par la présence du dépôt et C_f la constante d'étalonnage qui peut être déterminée par un étalonnage préalable. Pour un quartz α taillé, la masse volumique est de $2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et la vitesse de l'onde mécanique de $3\,340\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La fréquence de résonance étant de 5 MHz , la constante d'étalonnage est $C_f = 5,65\text{ MHz}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Une variation de fréquence de 1 Hz permet de détecter la présence d'un dépôt de masse $m_f = 17,7\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$. La dynamique de mesure permet de détecter jusqu'à $20\ \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

La grande application de cette microbalance à quartz (QCM Quartz Crystal Microbalance) est la détermination des épaisseurs de dépôt dans les techniques de dépôt sous vide. L'application microcapteur chimique est liée au dépôt d'un matériau, sur une ou les deux électrodes, ayant des propriétés de reconnaissance spécifique et dans lequel l'espèce chimique vient s'absorber. Les matériaux spécifiques pour la reconnaissance des gaz sont en général ceux qui sont utilisés en chromatographie en phase gazeuse [23].

Les gaz détectés et les matériaux spécifiques correspondants sont présentés dans le tableau.

Tableau 04: Correspondance entre le gaz détecté et le matériau spécifique déposé en couche mince sur la microbalance à quartz [23]

Gaz	Matériau spécifique
H ₂ O	Gélatine
H ₂ S	WO ₃ , Pb, Ag, Cu(CH ₃ COO) ₂
Hg	Au
Halothane	Huile silicone

Ces systèmes présentent une bonne sensibilité de détection (de l'ordre de quelques ppm avec les hydrocarbures halogénés), leurs réponses sont linéaires, leur mise en œuvre est simple et ils sont peu chers. Ils ont cependant une sélectivité imparfaite et une dynamique de mesure un peu limitée. Ils sont sensibles à la température ; des systèmes différentiels sont utilisés pour s'affranchir de cet effet.

La fréquence de résonance de ces systèmes est influencée par l'effet de la viscosité à l'interface quartz-liquide, ce qui les rend difficilement applicables pour les détections en milieu liquide. Des études sont en cours pour étendre ce domaine d'application. [23]

Tableau 05: Avantages et inconvénients des principales technologies de capteurs. [23]

<i>Types de capteur</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Oxydes métalliques	<ul style="list-style-type: none"> - Grande disponibilité - Faible coûts - Sensibilité élevée 	<ul style="list-style-type: none"> - Haute température - Sensibles à l'humidité - Empoisonnement possible - Dérive du zéro
Polymères conducteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Températures ambiantes - Grandes variétés des matériaux disponibles - Miniaturisation possible - Sensibilité élevée 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficultés de reproductibilité dans la préparation des capteurs - Très sensibles à l'humidité - Empoisonnement possible - Dérive du zéro
Acoustiques	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité à l'humidité négligeable - Température ambiante - Sensibilité et stabilité élevées 	<ul style="list-style-type: none"> - Composantes électroniques complexes requises - Détecteur de fréquence sujet à une dérive de sa fréquence de résonance

3.2. Les capteurs ioniques

Pour une analyse globale et rapide des composés volatils, et face aux limites que connaissent les méthodes d'analyse classiques des odeurs (GC-MS, GC-olfactométrie et capteurs de gaz classiques), une alternative a été proposée : il s'agit des capteurs ioniques. Des recherches récentes dans le domaine de l'agroalimentaire ont montré que l'injection rapide de la fraction volatile, préalablement concentrée ou non, d'un produit dans la chambre d'ionisation d'un spectromètre de masse fournit un spectre de masse considéré comme une empreinte caractéristique. Chaque fragment de masse (m/z) de l'empreinte spectrale est considérée comme un capteur, et parfois désigné sous le nom de pseudo capteur. Les empreintes spectrales sont utilisées à des fins de caractérisation et de prédiction de la qualité du produit [22]

A ce jour, le couplage sans étape séparative d'un spectromètre de masse avec des techniques d'extraction telles que l'espace de tête statique, l'espace de tête dynamique ou la microextraction en phase solide, a abouti à des méthodes de caractérisation rapides et économiques. Ces nouveaux systèmes connaissent actuellement un intérêt croissant et tendent à se positionner commercialement sur le marché des capteurs de gaz avec le Smart Nose (Marin-Epagnier, Suisse), le ChemsensorR (HP4440A/B, Agilent Technologies, Palo Alto, USA) ou encore le MS-SensorR (HKR Sensorsysteme GmbH, München, Allemagne). Ces systèmes se composent généralement d'un module d'extraction / injection des composés volatils, couplé à un spectromètre de masse, via une ligne de transfert. [22]

3.3. Les capteurs en milieu liquide

Ces capteurs permettent la détection en continu des espèces ioniques en milieu liquide. Ils sont tous basés sur des méthodes de détection électrochimique. [16]

3.3.1. Ion-Selective Field-Effect Transistors (ISFET)

En début des années 1970, l'ion-sélective à effet de champ des transistors (ISFET), dans lequel l'ion-sélective matériau est directement intégré avec un semi-conducteur, étaient développés. Une illustration schématique d'un ISFET. Le courant entre le drain et la source dépend de la densité chargée à la surface de semi-conducteur. Elle est commandée par le potentiel de grille, qui, dans le cas présent, est déterminée par des ions qui interagissent avec la membrane sélective d'ions. [17]

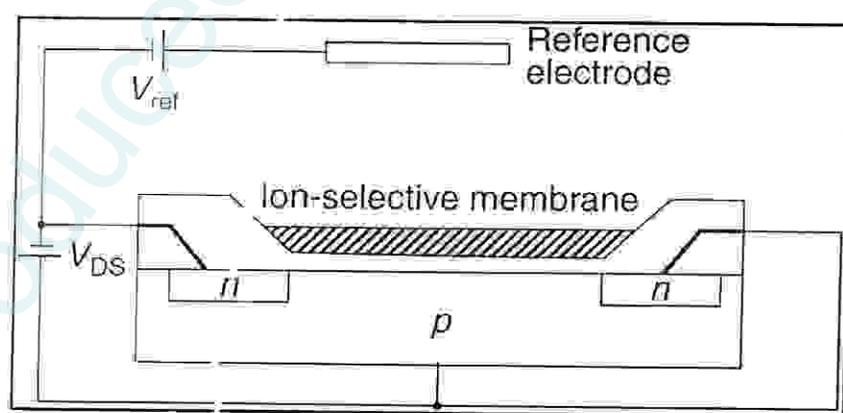


Figure 21: schéma d'illustration d'un "Ion-sensitive field-effect transistor [17]

Une caractéristique intéressante de ISFET est leur petite taille et sa capacité à être intégré directement dans la microélectronique (par exemple, pour le traitement du signal).

Une caractéristique intéressante de ISFET est leur de petite taille et sa capacité à être intégré directement dans la microélectronique (par exemple, pour le traitement du signal). En outre, il peut être un peu coûteux. En utilisant des différents types des membranes sélecteurs d'ions, On peut obtenir un réseau des capteurs avec des sélectivités différentes et très vaste. Ces caractéristiques le rendre particulièrement utile pour une utilisation dans la langue électronique,

Alpha M.O.S. un fournisseur commercial des nez électroniques, a également commercialisé une langue électronique. Appelé l'Astrée Système, la matrice de capteurs est constitué de différents les types de ISFET. [17]

3.3.2. Méthodes de cartographie du potentiel de surface

Une nouvelle technique a été développée dans laquelle la surface potentielle d'une structure semi-conductrice est localement mesurée. C'est un type particulier de système Potentiométrique qui fournit pour la détection sans contact sur une surface, il est donc un moyen pratique d'analyser une surface multifonctionnel. La surface du semi-conducteur agit comme une électrode de travail sur laquelle la solution d'essai est appliquée. Une électrode de référence et un auxiliaire électrode sont placées dans la solution. [17]

3.3.3. Capteurs conductimétriques

La conductance électrique G d'un corps, inverse de sa résistance, est proportionnelle à la surface S de la section perpendiculaire à la direction du courant et inversement proportionnelle à sa longueur :

La mesure de la conductance d'une solution électrolytique s'effectue en immergeant dans la solution une cellule de mesure comportant deux électrodes dont la surface S et la distance L sont déterminées par étalonnage dans une solution de conductivité connue. En première approximation, pour des solutions de concentration faible, la conductivité est proportionnelle à la concentration de l'électrolyte. Ces capteurs conductimétriques détectent toutes les espèces ioniques présentées dans la solution, leur utilisation demande de bien connaître la composition ionique des solutions puisqu'ils n'ont aucune sélectivité intrinsèque.

La mesure de conductance ne peut être effectuée en courant continu, car il se produirait alors une polarisation des électrodes et une électrolyse entraînant une variation de résistance. Il est donc indispensable de réaliser la mesure en courant alternatif de fréquence suffisamment élevée pour éliminer ces effets perturbateurs. Pour les solutions faiblement conductrices, dont la conductivité est inférieure à quelques microsiemens, on emploie de

préférence des fréquences de mesure faibles : 50 Hz par exemple. Pour les solutions fortement conductrices, dont la conductivité est supérieure à quelques millisiemens, des fréquences plus élevées sont employées : 10 kHz. Pour les solutions de conductivité moyenne, on utilise des fréquences comprises entre 102 et 103 Hz. La conductivité d'un électrolyte dépend de sa température ; lorsqu'on désire comparer, par mesure directe, les valeurs de conductivité de différentes solutions, en vue de déterminer leurs concentrations, il faut effectuer toutes les mesures à la même température. [16]

4. Systèmes de traitement et de reconnaissance de l'information

La première étape du traitement des réponses des capteurs consiste à convertir les signaux analogiques en information numérique. Par la suite, on procède généralement à une transformation des réponses des capteurs de façon à tenir compte des valeurs respectives des lignes de base de chaque capteur (c.-à-d. en absence d'exposition à un échantillon odorant). Deux modèles couramment employés à cette fin sont représentés par les équations **a** et **b**. Dans le premier cas, la réponse du capteur (**R_i**) est simplement divisée par la valeur de la ligne de base (**R_{oi}**), alors que dans le deuxième cas, c'est la différence (**R_i - R_{oi}**) est divisée par **R_{oi}**.

$$X_i = \frac{R_i}{R_{oi}} \quad A$$

$$X_i = \frac{(R_i - R_{oi})}{R_{oi}} \quad B$$

Après transformation, les données question peuvent être analysées par formant l'empreinte caractéristique de l'odeur en le biais de techniques mathématiques. Différentes méthodes statistiques sont employées à cette fin. Certaines sont de type paramétriques (analyse discriminante, « template matching ») alors que d'autres sont non paramétriques (analyse en composante principale, analyse en clusters, réseaux de neurones artificiels). Le choix de la technique d'analyse la plus appropriée dépend évidemment de l'application considérée. On note toutefois que les réseaux de neurones artificiels sont particulièrement bien adaptés à ce type d'application et que leur utilisation dans les nez électroniques est très répandue. [23]

Chapitre III :

Réseau de neurone artificiel

Produced with ScanTOPDF

1. Réseau de neurone

Au cours de la dernière décennie, les algorithmes d'apprentissage statistique ont suscité beaucoup d'intérêt dans le milieu académique et au sein d'entreprises de diverses industries. Ils ont été implantés avec succès pour l'accomplissement de tâches prédictives reliées à des processus statistiques observés pour lesquels on peut identifier plusieurs variables explicatives.

Tout d'abord, ce que l'on désigne habituellement par "réseau de neurones" est en fait un réseau de neurones artificiels basé sur un modèle simplifié de neurone. Ce modèle permet certaines fonctions du cerveau, comme la mémorisation associative, l'apprentissage par l'exemple, le travail en parallèle, mais le neurone artificiel est loin de posséder toutes les capacités du neurone biologique. Les réseaux de neurones biologiques sont ainsi beaucoup plus compliqués que les modèles mathématiques et informatiques. [23]

Certains réseaux de neurones sont des modèles de réseaux biologiques, mais d'autres ne le sont pas. Historiquement l'inspiration pour les réseaux de neurones provient cependant de la volonté de créer des systèmes artificiels sophistiqués, voire "intelligents", capables d'effectuer des opérations semblables à celles que le cerveau humain effectue de manière routinière, et d'essayer par là d'améliorer la compréhension du cerveau. [23]

La plupart des réseaux de neurones ont une certaine capacité d'apprentissage. Cela signifie qu'ils apprennent à partir d'exemples, de même que les enfants apprennent à distinguer les chiens des chats à partir d'exemples de chiens et de chats. Le réseau peut ensuite dans une certaine mesure être capable de généraliser, c'est-à-dire de produire des résultats corrects sur des nouveaux cas qui ne lui avaient pas été présentés au cours de l'apprentissage. [15]

2. Le modèle neurophysiologique

2.1. Le neurone

Le neurone biologique est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ces axones conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone.

Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie. [18]

2.2. structure

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones (mille milliards), avec 1000 à 10000 synapses (connexions) par neurone. [20]

Un neurone est constitué d'un corps cellulaire, dans lequel se trouve un noyau, et de prolongements, l'axone d'un côté, les dendrites de l'autre, le tout étant enveloppé d'une fine membrane de protection, la membrane plasmique.

- Le corps cellulaire, ou **péricaryon**, est relativement massif, souvent sphérique, parfois pyramidal. Il contient le noyau de la cellule.
- L'**axone**, ou **prolongement cylindraxile**, est une fibre de longueur variable, au contour net et régulier. Un neurone ne possède qu'un seul axone.
- Les **dendrites**, ou **prolongements protoplasmiques**, sont des fibres ramifiées, ayant un aspect granuleux, aux contours irréguliers. [13]

L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angströms (10^{-9} m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites (on dit une dendrite) du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse.

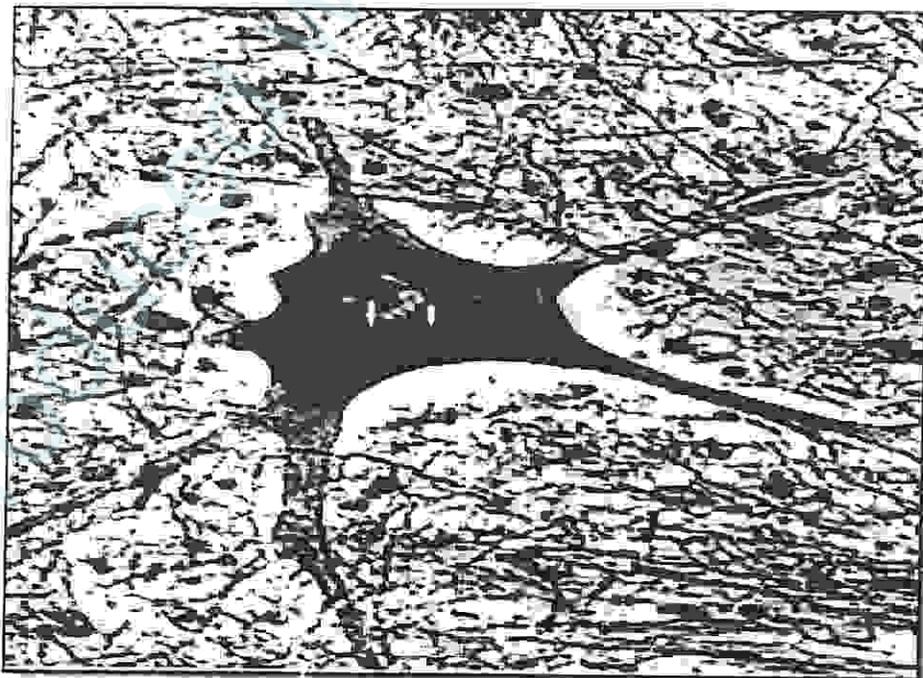


Figure 22: Le corps cellulaire du neurone contient un unique noyau arrondi (rose). [13]

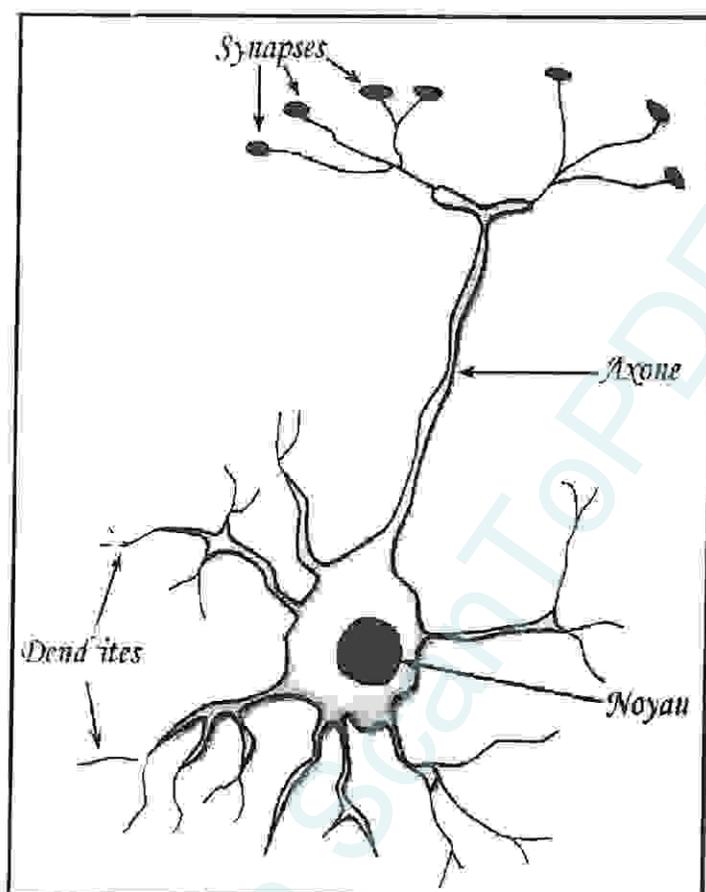


Figure 23: Un neurone avec son arborisation dendritique [13]

2.3. Fonctionnement

Comme dans toute cellule, il existe de part et d'autre de la membrane une différence de potentiel électrique (polarisation), appelée potentiel de repos : l'extérieur de la cellule est positif par rapport à l'intérieur, négatif. Mais les cellules excitables telles que le neurone se distinguent des autres par la capacité à créer un autre phénomène électrique, le potentiel d'action, ou influx nerveux : en quelques millièmes de seconde et sur une infime longueur de membrane, un afflux de sodium (ion positif) entre dans la cellule, ce qui dépolarise la membrane. Ce potentiel d'action se propage spontanément ensuite tout au long de la membrane. Il permet de transmettre un message, information sensitive ou ordre moteur. Les messages arrivent à un neurone donné par ses dendrites. Celles-ci amènent les messages au corps cellulaire (conduction centripète). Le corps cellulaire analyse les messages et en produit de nouveaux, lesquels cheminent le long de l'axone (conduction centrifuge). Un neurone est ainsi relié à d'autres neurones ou à des cellules musculaires. Le point de jonction entre l'axone d'un neurone et les dendrites d'un autre neurone s'appelle la synapse. Ce niveau, la

transmission du message d'un neurone à un autre fait intervenir diverses substances appelées neurotransmetteurs. [13]

3. Définition de RNA

Aujourd'hui de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones artificiels, comme connexionnisme ou neuromimétique.

Il n'y a pas de définition universellement acceptée de "réseau de neurones". On considère généralement qu'un réseau de neurones est constitué d'un grand ensemble d'unités (ou neurones), ayant chacune une petite mémoire locale. Ces unités sont reliées par des canaux de communication (les connexions, aussi appelées synapses d'après le terme biologique correspondant), qui transportent des données numériques. Les "unités" peuvent uniquement agir sur leurs données locales et sur les entrées qu'elles reçoivent par leurs connexions. [20]

Il y a une définition acceptée en informatique :

" Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau."

4. Le neurone formel

Le neurone artificiel (ou cellule) est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont (on parlera de neurones "amonts"). A chacune des entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval (on parlera de neurones "avals"). Chaque connexion est associée à un poids. [20]

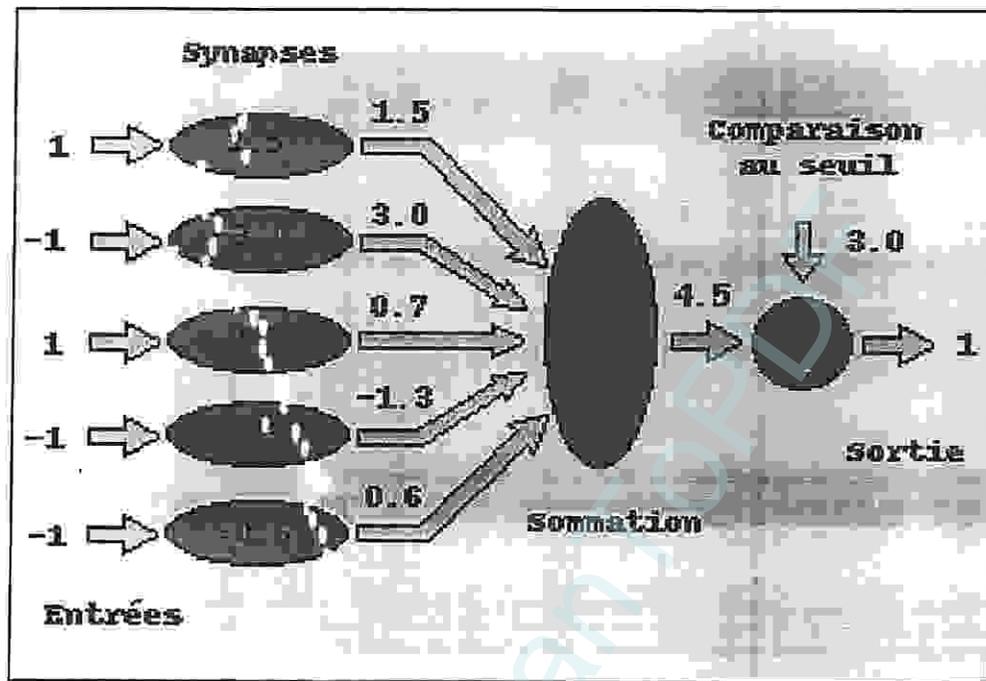


Figure 24. Le neurone formel (artificiel). [20]

4.1. Modélisation d'un neurone formel

Les réseaux de neurones formels sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de MM. Mac Culloch et Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle. La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de niveau neuronal sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une modélisation pour chacun d'entre eux.

On pourra résumer cette modélisation par le tableau qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel [20]

Tableau 06: la transition entre le neurone biologique et le neurone artificiel

<i>Neurone biologique</i>	<i>Neurone artificiel</i>
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

4.2. Apprentissage du réseau de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés.

4.2.1. Définition :

“L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle l comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. ”

Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt. Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Il est souvent impossible de décider a priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau pour une application donnée. A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation. Certains modèles de réseaux sont improprement dénommés à apprentissage permanent. Dans ce cas il est vrai que l'apprentissage ne s'arrête jamais, cependant on peut toujours distinguer une phase d'apprentissage (en fait de remise à jour du comportement) et une phase d'utilisation. Cette technique permet de conserver au réseau un comportement adapté malgré les fluctuations dans les données d'entrées.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction repose sur la forme des exemples d'apprentissage. Dans le cas de l'apprentissage supervisé, les exemples sont des couples (Entrée, Sortie associée) alors que l'on ne dispose que des valeurs (Entrée) pour l'apprentissage non supervisé. Remarquons cependant que les modèles à apprentissage non supervisé nécessitent avant la phase d'utilisation une étape de labélisation effectuée l'opérateur, qui n'est pas autre chose qu'une part de supervision.

4.2.2. Apprentissage supervisé

L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Tout le problème de l'apprentissage supervisé consiste, étant donné un ensemble d'apprentissage E de N couples

(entrée - sortie désirée) $(x_i, y_i) \quad i = 1, 2, \dots, n$, à déterminer le vecteur des poids w d'un réseau Fw capable de mettre ces informations en correspondance, c'est à dire un réseau tel que : $Fw(x_i) = y_i$ avec $i = 1, 2, \dots, n$.

4.2.3. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrée sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrée similaires (de même nature).

5. L'architecture du Réseau de neurone

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité (réseau à connexion complète).

5.1. Réseau monocouche

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids.

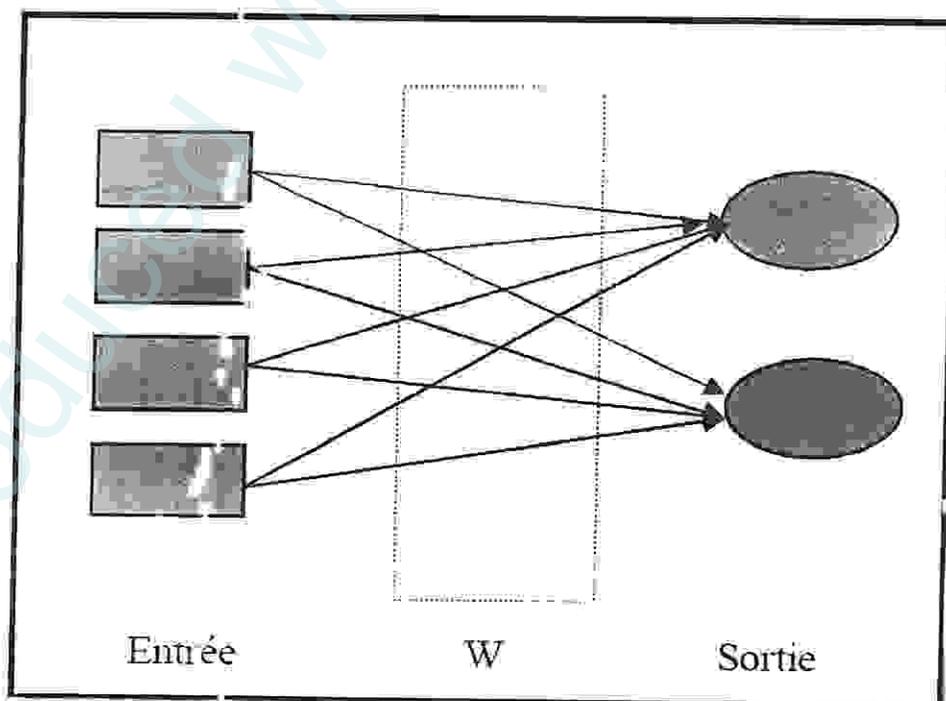


Figure 25: Réseau monocouche [20]

5.2. Réseau multicouche

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées.

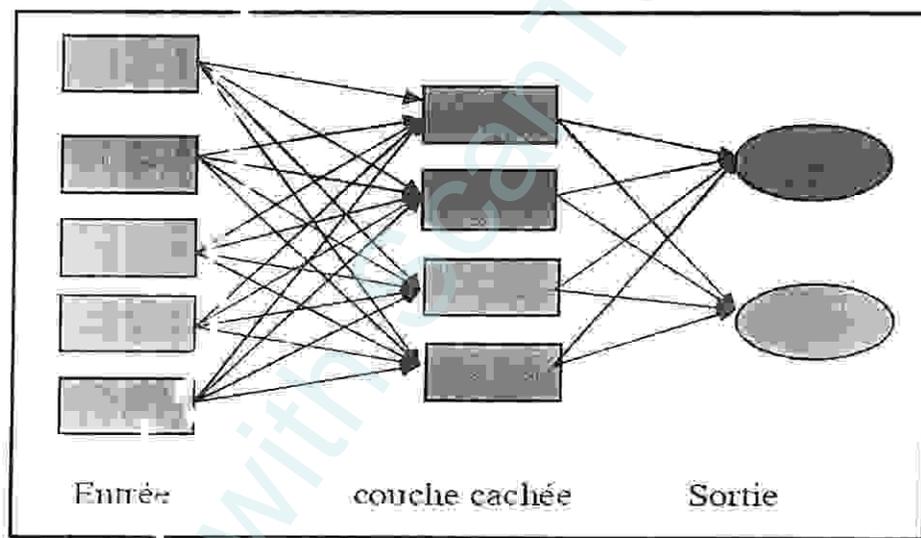


Figure 26: Réseau multicouche [20]

5.3. Réseau à connexion complète

C'est la structure d'interconnexion la plus générale. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même).

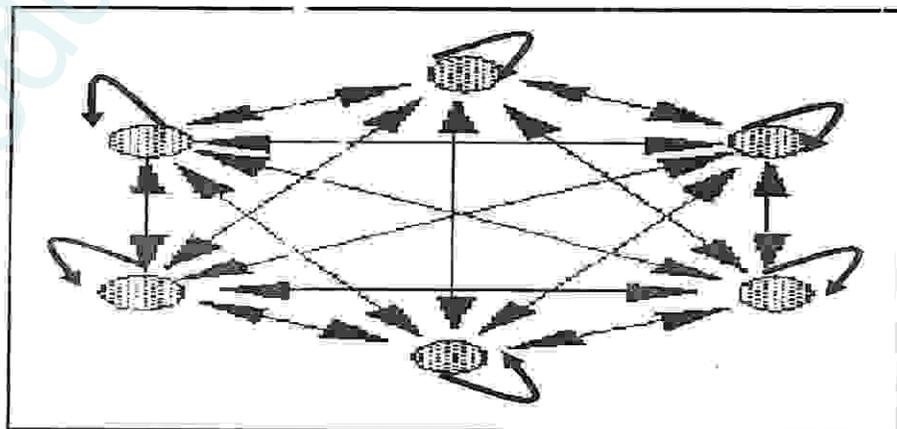


Figure 27: Réseau à connexion complète [20]

5.4. Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

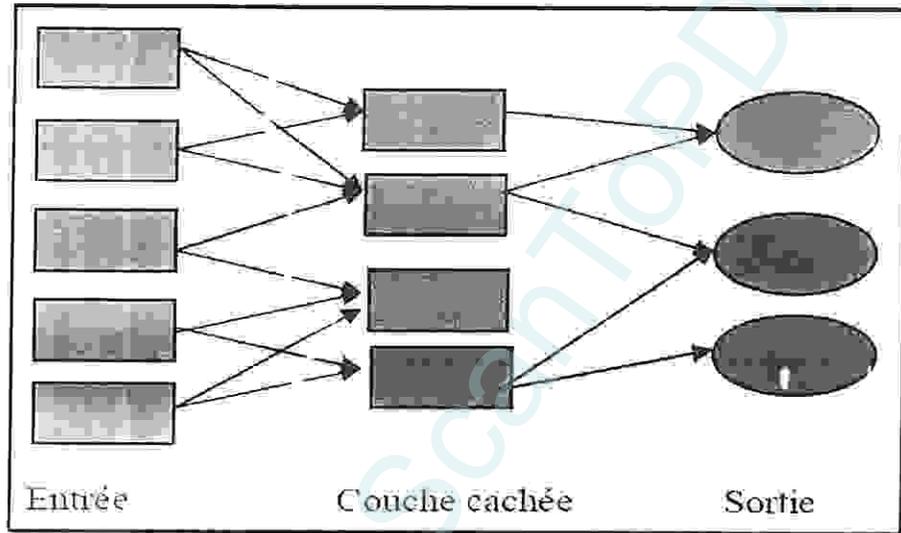


Figure 28: Réseau à connexion locale [20]

Chapitre VI :

Application

Produced with ScanTOPDF

1. Cadre d'étude

L'analyse numérique de la qualité alimentaire (la modélisation des analyses alimentaire) signifie l'application du réseau de neurone artificiel pour l'identification des espèces chimique qui se trouvent dans l'aliment.

2. L'objectif de travail

- Notre travail a pour but de créer un RNA capable d'identifier le type et la concentration d'un produit chimique dissous dans une solution de volume connue (40 ml), avec 4 probabilités (NaOH, HCl, KOH, Acide acétique). Ce réseau est constitué de :

- Une couche d'entrée.
- Une couche cachée qui contient à son tour quatre couches ; chacune de ces couches possède un programme ou une matrice selon son rôle. Elle peut aussi contenir les deux au même temps ; une matrice et un programme exécutable.
- Une couche de sortie constituée de deux neurones formels responsables de l'affichage de type et de concentration de la solution à partir des données traitées.

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire de chimie du département de biologie de l'université de Guelma.

3. Matériel et méthodes

3.1. Matériel

L'appareillage d'analyse

- PH mètre
- Thermomètre
- Balance de précision
- Conductimètre

L'outil du travail

- Becher (100 ml, 150ml)
- Eprouvette (100 ml, 250 ml)
- Pipette
- Pipette graduée 10 ml
- Poire
- Verre de montre
- Micropipette 1000 µl

Les produits chimiques

- Hydroxyde de sodium (NaOH)
- Acide acétique 99-100%
- Hydroxyde de potassium (KOH)
- Chlorure d'hydrogène HCl
- Eau distillée

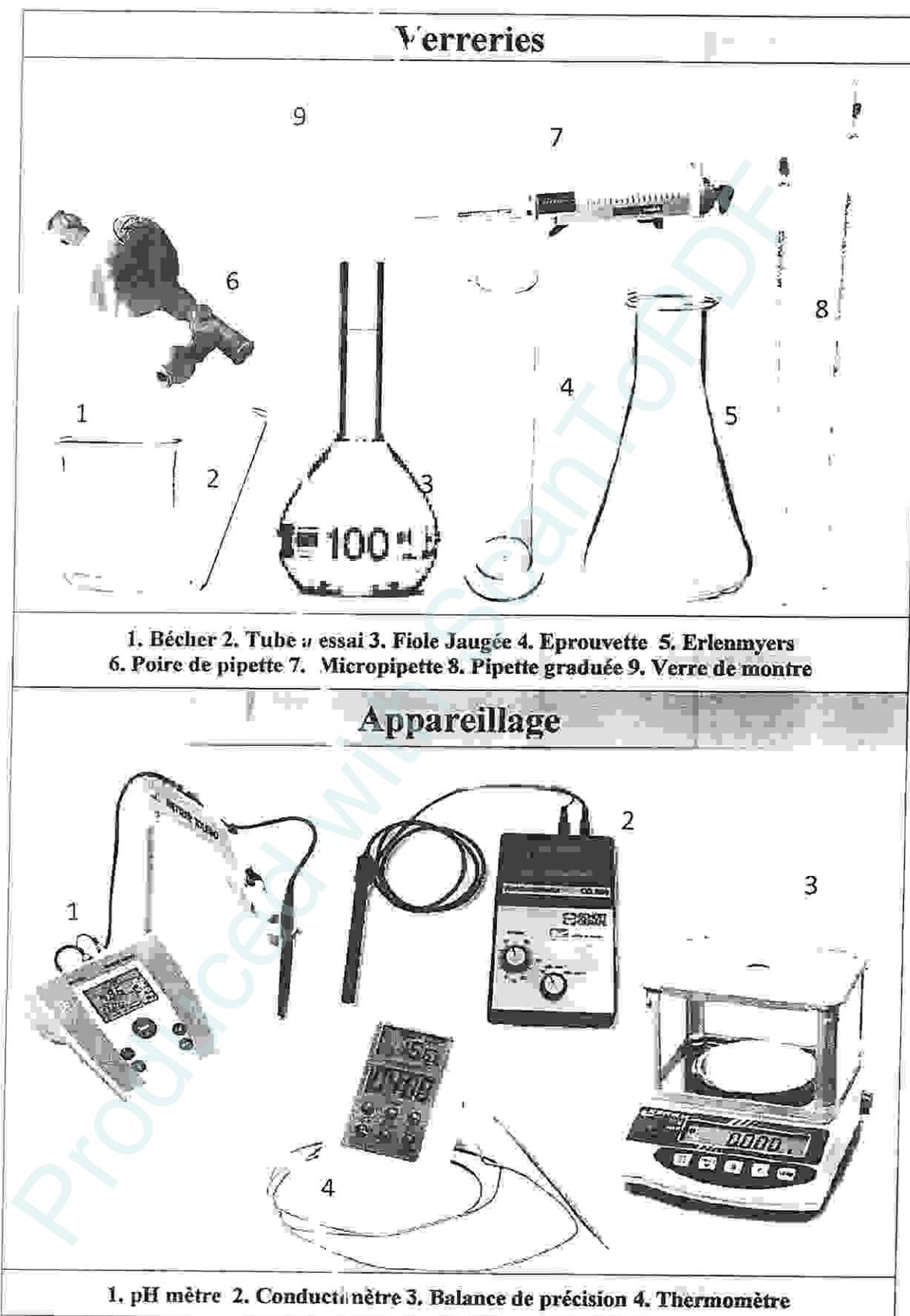


Figure 29: Le matériel utilisé

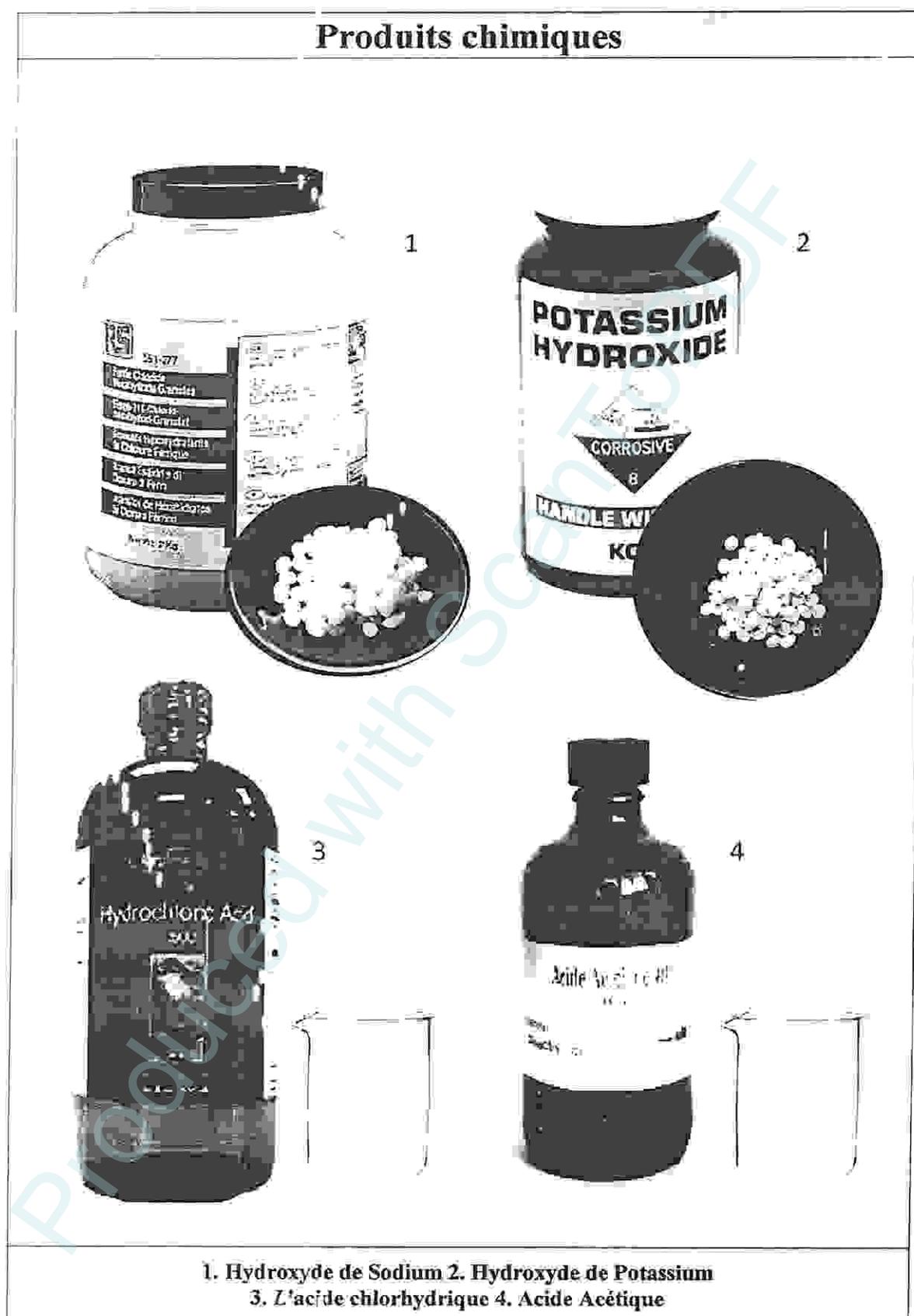


Figure 30: Les solutions et les produits chimiques

3.2. Méthode

Pour créer un réseau de neurone on doit suivre les 6 étapes suivantes.

- Collection des données et des résultats à partir du travail réalisé dans le laboratoire de chimie
- Dans la deuxième étape on analyse les données et on forme les matrices
- Chercher des liens logiques entre ces matrices
- Convertir ces liens logiques à des programmes d'informatique pour exécuter le RNA
- La structuration finale de ce Réseau de neurone artificiel
- La dernière étape c'est l'apprentissage du RNA par l'introduction des données, et l'application

3.2.1. Le travail en laboratoire

On a préparé 4 solutions (NaOH, HCl, KOH, Acide Acétique), et chacune de ces solutions est d'un volume connu (560 ml) et d'une concentration de 0,1 mol/L.

On a réparti ce volume (560 ml) sur 4 béchers de 150 ml pour avoir 4 solutions de 140 ml pour chaque espèce chimique.

Après la préparation des dilutions on mesure le pH, la conductivité et la température, par l'utilisation de pH mètre, conductimètre et un thermomètre.

a. Préparation des solutions mères

Préparation d'une solution par dissolution d'un composé solide

Objectif :

Préparer un volume V de solution de concentration molaire apporté c par dissolution d'un composé de masse molaire M

Calcul :

La quantité de matière dissoudre est : $n = \frac{m}{M}$ (m : masse à dissoudre)

Or : $c = \frac{n}{V} \Rightarrow c = \frac{m}{M.V}$ et $m = c.M.V$ (avec m en g, M en g.mol^{-1} , V en L et C en mol.L^{-1}).

- Pour la préparation de NaOH

$$m = c.M.V$$

$$m = 0,1 \times 40 \times 0,56 = 2,24 \text{ g}$$

- Pour la préparation de Koh

$$m = c \cdot M \cdot V$$

$$m = 0,1 \times 56,11 \times 0,56 = 3,14 \text{ g}$$

b. Préparation d'une solution par dilution d'une solution commerciale de concentration molaire inconnue

Objectif :

Préparer un volume V de solution de concentration molaire c en soluté apporté par dilution d'une solution commerciale de densité d , de pourcentage massique p et de masse molaire M .

Calcule :

- *Remarque préliminaire* : la densité d d'un liquide est le rapport de masse m d'un certain volume de ce liquide et de la masse m_{eau} du même volume d'eau : $m = \frac{m}{m_{\text{eau}}}$.

Or $m = \rho \cdot V$ et $m_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V$ (avec ρ et ρ_{eau} les masses volumiques respectives du liquide et de l'eau) $\Rightarrow d = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}}$ e. $\rho = d \cdot \rho_{\text{eau}}$: la masse volumique d'un liquide s'exprime en $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ par le même nombre que la densité.

Pour HCl de pourcentage 37%.

- *Calcule de la concentration molaire C_0 en soluté apporté de la solution commerciale :*
- 1,00 cm³ de la solution commerciale a une masse de 1,16 g.
- 1,00 L de la solution commerciale a une masse de $1,16 \times 10^3$ g.
- 1,00 L de la solution commerciale contient une masse $m = (1,16 \times 10^3 \times 37,0 / 100)$ g d'acide pur
- 1,00 L de la solution commerciale contient une quantité $n = (1,16 \times 10^3 \times 37,0 / 100 \times 36,5)$ mol d'acide pur.

La concentration molaire de la solution commerciale est : $C_0 = 11,8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Volume à prélever

$$\frac{0,1 \times 560}{11,8} = 4,745 \text{ ml}$$

Pour Acide acétique de pourcentage 99,5%

- *Calcule de la concentration molaire C_0 en soluté apporté de la solution commerciale :*
- 1,00 cm³ de la solution commerciale a une masse de 1,048 g.

- 1,00 L de la solution commerciale a une masse de $1,048 \times 10^3$ g.
- 1,00 L de la solution commerciale contient une masse $m = (1,048 \times 10^3 \times 99,5 / 100)$ g d'acide pur.
- 1,00 L de la solution commerciale contient une quantité $n = (1,048 \times 10^3 \times 99,5 / 100 \times 60,04)$ mol d'acide pur.

La concentration molaire de la solution commerciale est: $C_0 = 17,36 \text{ mol.L}^{-1}$

Volume à prélever

$$\frac{0,1 \times 560}{17,36} = 3,22 \text{ ml}$$

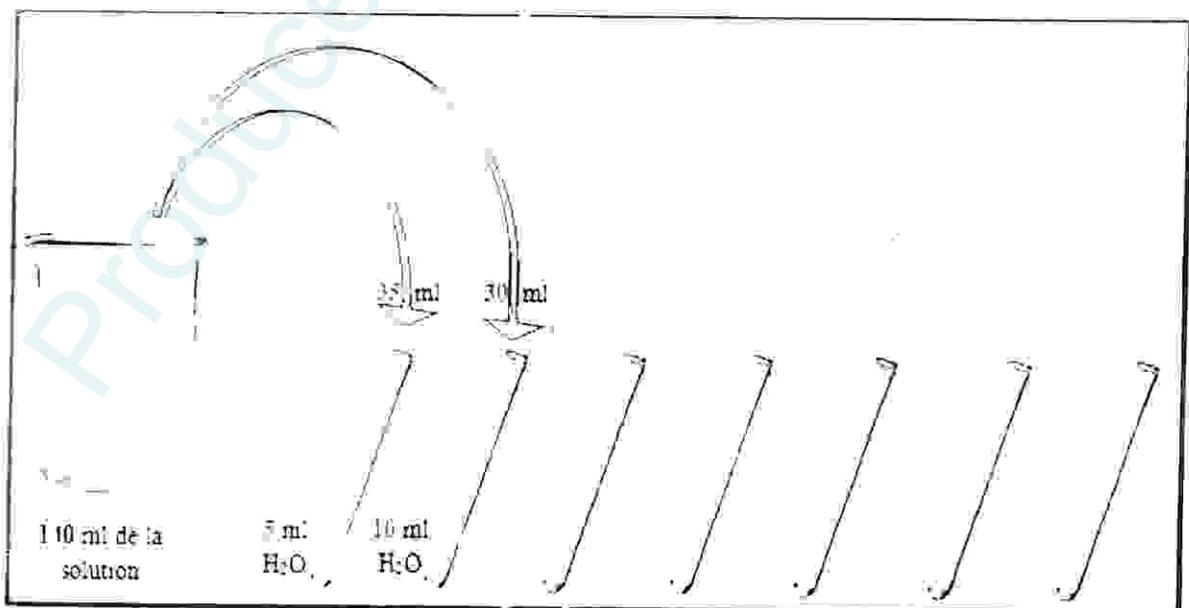
Après la répartition de solution mère de chaque espèce chimique sur quatre béchers on fait une série des dilution, sept dilutions des concentrations différentes et a chaque fois on mesure les 3 paramètres (PH, température et conductivité).

Pour chaque dilution on mesure le pH, la conductivité et la température, par l'utilisation de pH mètre, conductimètre et un thermomètre.

Température en **Degré Celsius**

Conductivité en **microsiemens**

La série des dilutions est faite par l'ajout d'un volume d'eau distillée précis à un volume de la solution mère pour avoir un volume totale de 40 ml pour toutes les dilutions. On commence par 35 ml de la solution mère avec 5 ml d'eau distillée, et à chaque fois 5 ml de H_2O supplémentaire soit ajouté pour le tube suivant.



4. Résultats et discussion

4.1. Les résultats de NaOH

Tableau 07: résultats des mesures des dilutions de NaOH

V de solution mère de NaOH	35 ml	30 ml	25 ml	20 ml	15 ml	10 ml	5 ml
V de H ₂ O Ajouté	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml	35 ml
Concentration de NaOH	0.0875 mol/l	0.075 mol/l	0.0625 mol/l	0.050 mol/l	0.0375 mol/l	0.025 mol/l	0.0125 mol/l
Température (1)	24	23	23.1	22.9	22.6	23	23.5
Température (2)	23.9	23	23	22.8	21.1	22.9	23.2
Température (3)	23.2	23.1	23.2	23	22.3	23	23.4
Température (4)	24.1	23	23	23	22.7	23.1	23.2
pH (1)	13.39	13.34	13.27	13.16	13.07	12.93	12.83
pH (2)	13.35	13.26	13.2	13.14	13.07	13	12.9
pH (3)	13.37	13.3	13.22	13.16	13.09	13.01	12.93
pH (4)	13.33	13.28	13.21	13.13	13.07	13.02	12.95
Conductivité (1)	376	406	547	561	559	565	586
Conductivité (2)	403	414	503	493	555	587	573
Conductivité (3)	374	422	576	581	583	577	591
Conductivité (4)	411	435	570	580	582	570	586

4.2. Les résultats de KOH

Tableau 08: résultats des mesures des dilutions de KOH

V de solution mère de KOH	35 ml	30 ml	25 ml	20 ml	15 ml	10 ml	5 ml
V de H ₂ O Ajouté	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml	35 ml
Concentration de KOH	0.0875 mol/l	0.075 mol/l	0.0625 mol/l	0.050 mol/l	0.0375 mol/l	0.025 mol/l	0.0125 mol/l
Température (1)	21.7	22.8	22	22	22.3	22.2	22.3
Température (2)	22.8	22.7	22	22.4	22.1	22.3	22.4
Température (3)	22.9	22.5	21.7	21.6	22.2	21	22
Température (4)	22.5	21.7	22	21.3	22.1	21.6	22.1
pH (1)	13.28	13.16	13.01	12.85	12.73	12.62	12.53
pH (2)	13.29	13.17	13.07	13	12.88	12.77	12.66
pH (3)	13.29	13.17	13.06	12.99	12.87	12.78	12.67
pH (4)	13.27	13.15	13.03	12.95	12.83	12.68	12.62
Conductivité (1)	628	620	630	669	655	659	670
Conductivité (2)	620	624	635	640	665	649	653
Conductivité (3)	630	646	641	635	640	643	667
Conductivité (4)	641	639	653	640	666	670	673

4.3. Les résultats obtenus de l'acide acétique

Tableau 09: résultats des mesures des dilutions d'acide acétique

V de solution mère d'acide acétique	35 ml	30 ml	25 ml	20 ml	15 ml	10 ml	5 ml
V de H ₂ O Ajouté	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml	35 ml
Concentration d'acide acétique	0.0875 mol/l	0.075 mol/l	0.0625 mol/l	0.050 mol/l	0.0375 mol/l	0.025 mol/l	0.0125 mol/l
Température (1)	21,1	21,6	21	21	20,8	20,7	21,2
Température (2)	21,2	20,3	20,7	20,7	21,8	21,4	22
Température (3)	22	21,9	21,3	20,6	20,3	21	21,7
Température (4)	21,2	20,7	22	20,8	21,5	21,4	20,8
pH (1)	2.96	3.04	3.11	3.15	3.21	3.27	3.35
pH (2)	2.93	3	3.08	3.16	3.22	3.29	3.40
pH (3)	2.94	3.01	3.09	3.16	3.22	3.28	3.39
pH (4)	2.93	3	3.1	3.15	3.21	3.3	3.41
Conductivité (1)	187	172	199.5	191.5	168.5	157.5	108.9
Conductivité (2)	172.1	191	185.3	177.7	163.2	160.6	155.5
Conductivité (3)	188.3	172	170.6	170.5	180.2	179.7	186.6
Conductivité (4)	167.7	193.5	185.1	180.2	173.1	155.2	157.6

4.4. Les résultats de Hcl

Tableau 10: résultats des mesures des dilutions Hcl

V de solution mère de Hcl	35 ml	30 ml	25 ml	20 ml	15 ml	10 ml	5 ml
V de H ₂ O Ajouté	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml	30 ml	35 ml
Concentration Hcl	0.0875 mol/l	0.075 mol/l	0.0625 mol/l	0.050 mol/l	0.0375 mol/l	0.025 mol/l	0.0125 mol/l
Température (1)	23.7	23.5	23.5	22.5	24.1	23.05	23.3
Température (2)	23	23.6	23.4	23.1	23	23.5	23.9
Température (3)	23.6	23	20.5	23.06	24	22.2	23.2
Température (4)	23.1	24	23.2	21.1	22.9	23.6	23.9
pH (1)	0.47	0.57	0.65	0.75	0.85	0.96	1.05
pH (2)	0.5	0.59	0.67	0.76	0.84	0.96	1.08
pH (3)	0.48	0.57	0.66	0.73	0.81	0.93	1.06
pH (4)	0.48	0.56	0.67	0.72	0.83	0.93	1.05
Conductivité (1)	642	601	677	675	650	670	675
Conductivité (2)	633	611	664	663	663	675	666
Conductivité (3)	650	684	676	650	634	667	680
Conductivité (4)	670	663	650	656	677	670	665

Après la mesure des trois paramètres de toutes les dilutions de chaque espèce chimique et la collection des résultats mentionnés dans les tableaux, on fait une étude statistique pour déterminer la relation entre la concentration et chaque paramètre, et à chaque fois on calcule le coefficient de corrélation (r) et le coefficient de détermination (r^2).

La détermination des ces coefficients a pour but de définir le paramètre ou les paramètres qui ont une relation linéaire avec la concentration de la solution.

5. Étude statistique de corrélation entre chaque paramètre et la concentration

Tableau 11. Corrélation des concentrations avec les pH

	Dél 1	Dél 2	Dél 3	Dél 4	Dél 5	Dél 6	Dél 7
la [] mol/L	0,0875	0,075	0,0625	0,050	0,0375	0,025	0,0125
\bar{pH} (NaOH)	13,36	13,29	13,22	13,14	13,19	12,98	12,90
\bar{pH} (KOH)	13,28	13,16	13,05	12,95	12,83	12,73	12,62
\bar{pH} (HCl)	0,482	0,576	0,668	0,746	0,830	0,944	1,060
\bar{pH} (A.A)	2,94	3,01	3,09	3,15	3,21	3,29	3,39

	la [] mol/L	
\bar{pH} (NaOH)	$r = 0,95$	$r^2 = 91\%$
\bar{pH} (KOH)	$r = 1$	$r^2 = 100\%$
\bar{pH} (HCl)	$r = 0,99$	$r^2 = 99,54\%$
\bar{pH} (A.A)	$r = 0,99$	$r^2 = 99,46\%$

Tableau 12: Corrélation des températures avec les concentrations

	Dél 1	Dél 2	Dél 3	Dél 4	Dél 5	Dél 6	Dél 7
la [] mol/L	0,0875	0,075	0,0625	0,050	0,0375	0,025	0,0125
\bar{t} (NaOH)	23,8	23,02	23,07	22,92	22,17	23	23,32
\bar{t} (KOH)	22,47	22,47	21,92	21,90	22,15	21,75	22,2
\bar{t} (HCl)	23,35	23,52	22,65	22,36	23,5	23,08	23,57
\bar{t} (A.A)	21,37	21,12	21,35	20,77	21,10	21,12	21,42

	la [] mol/L	
\bar{t} (NaOH)	$r = 0,37$	$r^2 = 14,14\%$
\bar{t} (KOH)	$r = 0,23$	$r^2 = 5,37\%$
\bar{t} (HCl)	$r = 0,10$	$r^2 = 1,037\%$
\bar{t} (A.A)	$r = 0,034$	$r^2 = 0,11\%$

Tableau 13: Corrélation des conductivités avec les concentrations

	Dél 1	Dél 2	Dél 3	Dél 4	Dél 5	Dél 6	Dél 7
$[\text{A}^-] \text{ mol/L}$	0.0875	0.075	0.0625	0.050	0.0375	0.025	0.0125
$\bar{C} \text{ (NaOH)}$	388,5	419,5	449	553,75	569,75	574,75	584
$\bar{C} \text{ (KOH)}$	629,75	632,75	639,75	646	656,5	655,25	655,75
$\bar{C} \text{ (HCl)}$	648,75	639,75	666,75	661	656	670,5	671,5
$\bar{C} \text{ (A.A)}$	178,77	182,12	185,12	179,87	171,25	163,25	152,15

	$[\text{A}^-] \text{ mol/L}$	
$\bar{C} \text{ (NaOH)}$	$r = 0,94$	$r^2 = 89,26\%$
$\bar{C} \text{ (KOH)}$	$r = 0,98$	$r^2 = 96,16\%$
$\bar{C} \text{ (HCl)}$	$r = 0,77$	$r^2 = 60,45\%$
$\bar{C} \text{ (A.A)}$	$r = 0,85$	$r^2 = 73,24\%$

L'analyse des résultats obtenues à partir de l'étude statistique a montré que :

- Le pH des solutions est fortement lié avec la concentration des déluions, le coefficient de corrélation est entre [0,95 et 1] et le coefficient de détermination est entre [91% et 100%]. Donc la concentration des solutions a une grande influence sur leurs pH
- La relation entre la température et la concentration est fortement non linéaire, le r^2 est entre [0,043 et 0,37], et le coefficient de détermination à un intervalle de 0,11 et 14,14%. Ça veut dire qu'il n'y a aucune relation entre ces deux paramètres.
- Cette étude a montré aussi qu'il y a un rapport entre la concentration et la conductivité de la solution, ce rapport est linéaire et a un coefficient de corrélation entre [0,85 et 0,98].

A partir de ces résultats on trouve que parmi les paramètres étudiés, le pH est le plus corrélé avec la concentration, donc on le choisit comme un repère pour calculer l'équation de la régression et minimiser le plus possible l'erreur d'estimation

Les équations de la régression entre les pH et la concentration

NaOH : $f(x) = 0,15706 \cdot X - 2,01601$

KOH : $f(x) = 0,11467 \cdot X - 1,4345$

HCl : $f(x) = -0,13237 \cdot X + 0,15033$

Acide Acétique : $f(x) = -0,1714 \cdot X + 0,59066$

Pour chacune de ces équations on remplace X par la valeur des quatre valeurs de pH et cela nous donne 7 matrices pour sept concentrations, chaque matrice contient quatre colonnes qui présentent les quatre solutions.

Exemple : la matrice de la concentration 0,0875 (Annexe 1)

$$\left(\begin{array}{cccc} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ 0,0881 & 0,0870 & 0,0888 & 0,0833 \\ 0,0841 & 0,0807 & 0,0894 & 0,0844 \\ 0,0867 & 0,0838 & 0,0894 & 0,0867 \\ 0,0867 & 0,0775 & 0,0871 & 0,0884 \end{array} \right)$$

Donc chaque matrice de ces sept matrices occupe un neurone dans la couche 2, comme la figure au dessous montre.

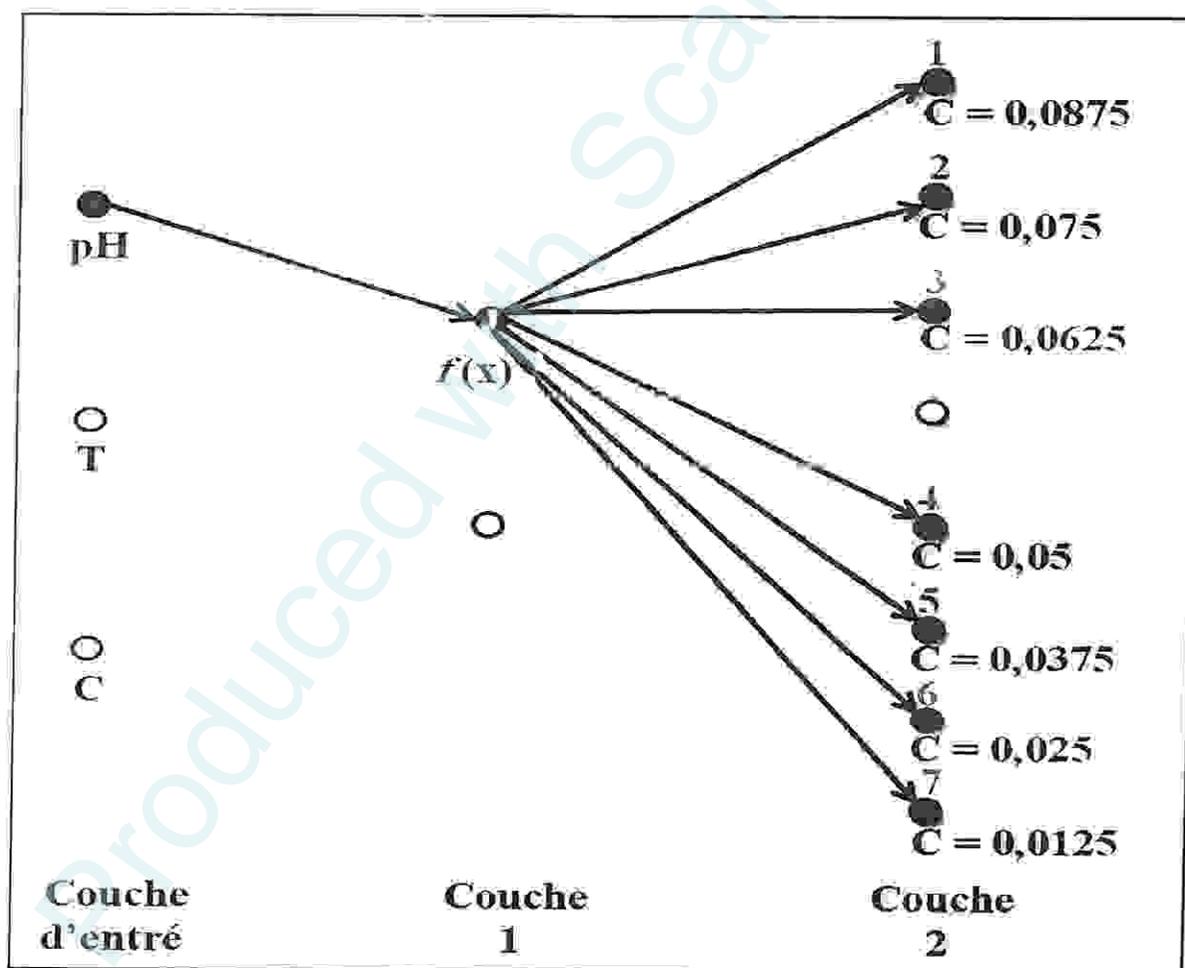


Figure 31: RNA pour l'analyse quantitative

La valeur du pH de la solution mesurée pénètre dans le RNA par la couche d'entrée, puis elle se transmette vers la couche 1 qui contient les quatre équations de régression, le

neurone de cette couche calcule les quatre nouvelles équations en remplaçant à chaque fois le (X) par la valeur du pH mesurée. Cela donne quatre valeurs.

Ces valeurs se passent vers la couche 2 et se distribuent à tous les sept neurones qui à son tour les compare avec ses matrices en faisant une division sur toutes ces données.

Le neurone qui contient une valeur égale à la valeur mesurée envoie son code (1, 2, 3,.....,7) au couche 4. Dans laquelle les résultats subissent un traitement final de confirmation.

Ces équations et ce RNA nous permettent d'estimer la valeur de la concentration de la solution à partir de son pH, mais elles ne nous permettent pas de connaître son type, pour cela on a fait une autre étude pour résoudre ce problème.

On a cherché la corrélation entre les trois paramètres eux mêmes, si on trouve une corrélation fortement linéaire ; cela nous permet d'identifier le type de la solution à partir des équations de la régression entre ces paramètres.

6. Étude statistique pour déterminer la corrélation entre les trois paramètres de chaque espèce chimique

6.1. NaOH

Tableau 14. résultats de l'étude de corrélation des paramètres de NaOH

pH (NaOH)	13,36	13,29	13,22	13,14	13,19	12,98	12,90
C (NaOH)	388,5	419,5	449	553,75	569,75	574,75	584

$$r = 0,80 \quad r^2 = 64,48\%$$

pH (NaOH)	13,36	13,29	13,22	13,14	13,19	12,98	12,90
\bar{t} (NaOH)	23,8	23,02	23,07	22,92	22,17	23	23,32

$$r = 0,068 \quad r^2 = 1,99\%$$

C (NaOH)	388,5	419,5	449	553,75	569,75	574,75	584
\bar{t} (NaOH)	23,8	23,02	23,07	22,92	22,17	23	23,32

$$r = 0,53 \quad r^2 = 28,94\%$$

6.2. KOH

Tableau 15 : résultats de l'étude de corrélation des paramètres de KOH

pH (KOH)	13,28	13,10	13,05	12,95	12,83	12,73	12,62
C (KOH)	629,75	632,25	639,75	646	656,5	655,25	655,75

$$r=0,98 \quad r^2=97,12\%$$

pH (KOH)	13,28	13,16	13,05	12,95	12,83	12,73	12,62
\bar{t} (KOH)	22,47	22,47	21,92	21,90	22,15	21,75	22,2

$$r=0,032 \quad r^2=0,1\%$$

C (KOH)	629,75	632,25	639,75	646	656,5	655,25	655,75
\bar{t} (KOH)	22,47	22,47	21,92	21,90	22,15	21,75	22,2

$$r=0,47 \quad r^2=22,63\%$$

6.3. Hcl

Tableau 16 : résultats de l'étude de corrélation des paramètres de Hcl

pH (Hcl)	0,482	0,576	0,668	0,746	0,830	0,944	1,060
C (Hcl)	648,75	639,75	666,75	661	656	670,5	671,5

$$r=0,78 \quad r^2=60,84\%$$

pH (Hcl)	0,482	0,576	0,668	0,746	0,830	0,944	1,060
\bar{t} (Hcl)	23,35	23,52	22,65	22,36	23,5	23,08	23,57

$$r=0,12 \quad r^2=1\%$$

C (Hcl)	648,75	639,75	666,75	661	656	670,5	671,5
\bar{t} (Hcl)	23,35	23,52	22,65	22,36	23,5	23,08	23,57

$$r=0,33 \quad r^2=11,11\%$$

6.4. Acide Acétique

Tableau 17: résultats de l'étude de corrélation des paramètres d'Acide acétique

pH (AA)	2,94	3,01	3,09	3,15	3,21	3,29	3,39
C (AA)	178,77	182,12	185,12	179,87	171,25	163,25	152,15

$$r=0,86 \quad r^2=75,47\%$$

pH (AA)	2,94	3,01	3,09	3,15	3,21	3,29	3,39
\bar{E} (AA)	21,37	21,12	21,35	20,77	21,10	21,12	21,42

$$r = 0,01 \quad r^2 = 0,01\%$$

C (AA)	178,77	182,12	185,12	179,87	171,25	163,25	152,15
\bar{E} (AA)	21,37	21,12	21,35	20,77	21,10	21,12	21,42

$$r = 0,28 \quad r^2 = 7,84\%$$

Malgré qu'on ait trouvé un coefficient de corrélation très fort entre le pH et la conductivité dans le cas de KOH, mais les autres résultats étaient très désorganisés, ce que peut augmenter la probabilité de l'erreur dans la détermination du type de la solution. Donc on n'a pas pu baser sur cette méthode.

Pour cela et pour résoudre ce problème on a créé pour chaque solution une matrice qui contient la somme des trois paramètres, la somme se fait par l'addition des valeurs qui se trouvent dans la même colonne et qui ont la même concentration.

Matrice de la somme des matrices des trois paramètres de NaOH

1	2	3	4	5	6	7
403.39	429	593.47	597.67	594.67	600.93	622.33
440.25	450	539.2	528.94	589.17	622.9	622.33
411.27	458.4	612.42	617.16	618.39	613.01	627.33
448.43	471.28	606.21	616.13	618.4	613.12	622.15

Matrice de la somme des matrices des trois paramètres de KOH

1	2	3	4	5	6	7
662.98	655.96	665.01	704.15	689.93	693.72	704.83
656.09	659.87	670.07	675.4	989.98	684.07	687.96
666.19	681.67	675.76	699.59	675.07	676.78	701.67
676.77	674.05	688.03	674.25	700.93	704.28	701.72

Matrice de la somme des matrices des trois paramètres de Hcl

1	2	3	4	5	6	7
666.17	625.07	677	698.25	674.95	694.01	699.35
656.5	635.19	688.07	686.86	686.84	699.46	690.98
674.08	707.57	697.16	673.87	685.81	690.13	704.28
693.58	687.56	673.87	677.82	700.73	694.53	689.53

Matrice de la somme des matrices des trois paramètres d'acide acétique

1	2	3	4	5	6	7
211.06	196.64	223.01	215.25	192.51	181.47	133.05
196.23	214.3	209.08	201.56	186.29	185.29	180.9
213.24	196.91	194.99	194.26	203.72	203.98	208.3
170.63	217.2	210.2	201	197.81	179.9	181.81

La réalisation de ces matrices permettent à notre RNA de faire une analyse qualitative plus précisée ; parce que la somme de trois paramètres réduit la probabilité d'avoir des valeurs égaux d'un pourcentage de 98 %.

A partir de l'étude statistique (Étude statistique pour déterminer la corrélation entre les trois paramètres de chaque espèce chimique) et la formation des matrices de la somme des trois paramètres ; nous avons créé le réseau de neurone artificiel qui peut analyser la solution qualitativement (pouvoir identifier le type d'espèce chimique dissous dans l'eau).

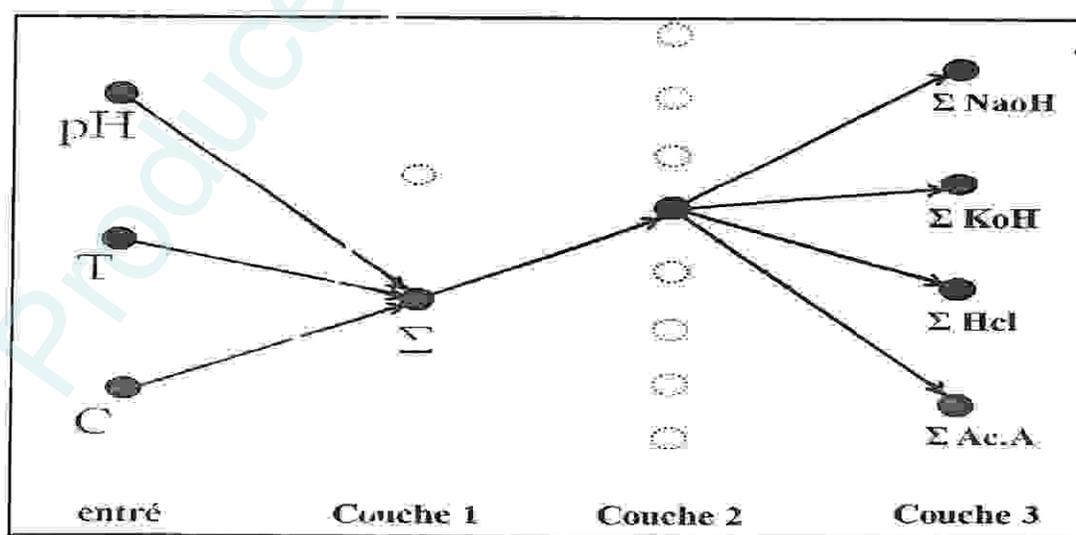


Figure 32 : Le RNA pour l'analyse qualitative

Après la rentrée des valeurs des trois paramètres, le neurone de la couche 1 les somme et envoie le résultat à la couche 2 qui à son tour le distribue vers tous les quatre neurones de la couche 3 ; chacun de ces neurones contient une matrice de la somme d'un seul type de solution.

Chaque neurone compare le résultat avec les données de sa matrice par une division des deux valeurs.

Si

- Il obtient 1 : ça veut dire que les deux valeurs sont égales.
- Si non : les deux valeurs sont différentes.

Quand un neurone obtient la valeur 1, il envoie l'ordre de la colonne dans laquelle il a trouvé la valeur.

Ex :

1 ↑	2 ↑	3 ↑	4 ↑	5 ↑	6 ↑	7 ↑
211.06	196.64	223.01	215.25	192.51	181.47	133.05
196.23	214.3	209.08	201.56	186.29	185.29	180.9
213.24	196.91	194.99	194.26	203.72	203.98	208.3
170.63	217.2	210.2	201	197.81	179.9	181.81

Après la division, il trouve que le résultat de la division de la valeur entouré sur la somme des paramètres mesurés égale à 1.

Il envoie l'ordre de la colonne où elle se trouve cette valeur vers la couche 4. Donc il envoie 2.

Couche 4 :

Pour les matrices de la somme, on a remarqué qu'il y a deux valeurs égales dans deux matrices différentes, c'est la valeur 704,28. Ce que peut engendrer une mal identification de la solution, pour cela la couche 4 a été réalisée pour régler ce problème.

Comme on a vu, la couche 3 envoie l'ordre de la colonne qui contient la valeur égale à la somme des paramètres vers la couche 4. La couche 4 reçoit aussi un code qui exprime l'ordre de la concentration de cette solution.

Cette couche contient quatre matrices, chacune est constituée de sept colonnes, c'est le nombre des concentrations, et deux lignes, c'est les deux codes envoyés par les couches précédentes. Pour couvrir toutes les probabilités.

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{cccccc}
 1;1 & 1;2 & 1;3 & 1;4 & 1;5 & 1;6 & 1;7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7
 \end{array} \right) \\
 \\
 \left(\begin{array}{cccccc}
 2;1 & 2;2 & 2;3 & 2;4 & 2;5 & 2;6 & 2;7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7
 \end{array} \right) \\
 \\
 \left(\begin{array}{cccccc}
 3;1 & 3;2 & 3;3 & 3;4 & 3;5 & 3;6 & 3;7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7
 \end{array} \right) \\
 \\
 \left(\begin{array}{cccccc}
 4;1 & 4;2 & 4;3 & 4;4 & 4;5 & 4;6 & 4;7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

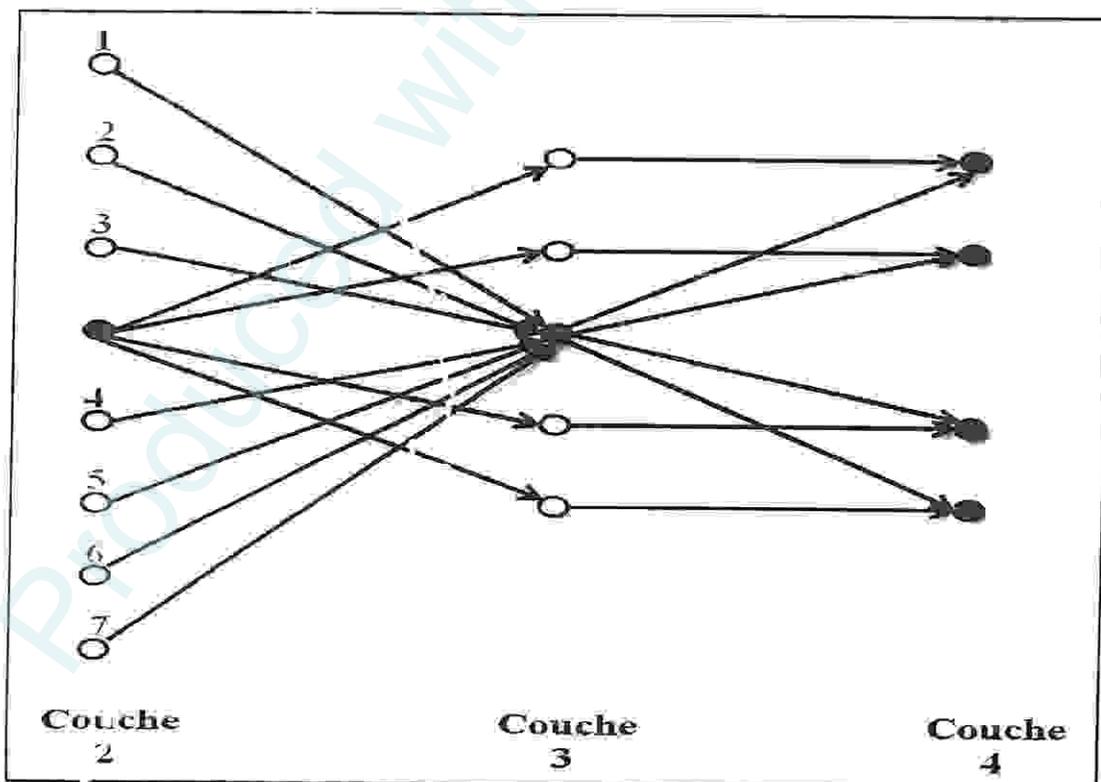


Figure 33: La partie du RNA responsable de la confirmation des résultats.

Le neurone compare les valeurs reçues avec les données des matrices, par une division.

Il envoie le couple de données qui donne 1 après sa division au couche 5, qui contient deux neurones, l'un pour le type de la solution et l'autre pour sa concentration.

Dans ce cas les chiffres en rouge signifient le type, et les chiffres en bleu pour la concentration.

Les chiffres en rouge se transmettent au neurone 1, qui les décode et affiche le type de la solution, selon la matrice suivante

1	2	3	4
NaOH	KOH	HCl	Acide acétique

Les chiffres en bleu se transmettent au neurone 2, qui les décode aussi et affiche la concentration qui convient.

1	2	3	4	5	6	7
0.0875	0.075	0.0625	0.05	0.0375	0.025	0.0125

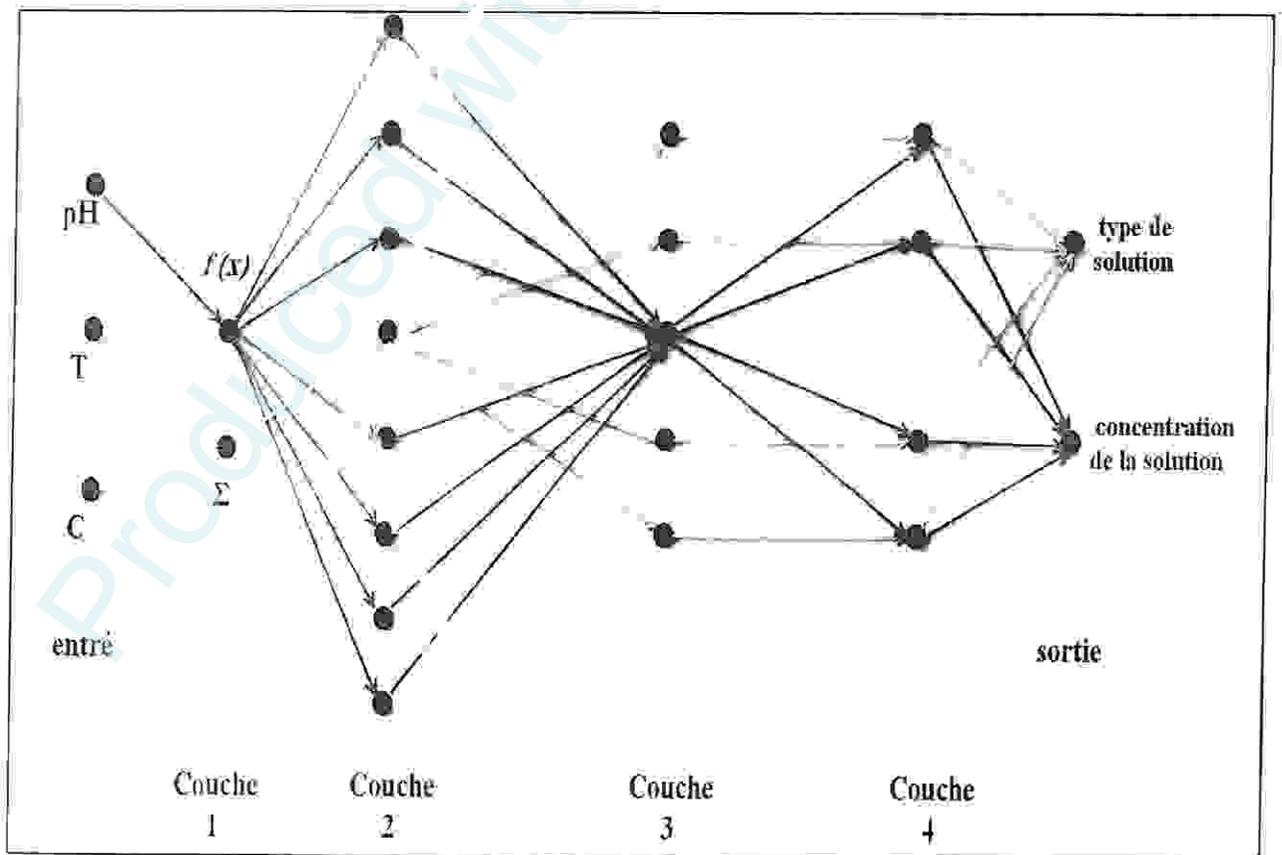


Figure 34: RNA finale.

Conclusion générale

Produced with ScanTOPDF

Conclusion Générale

Dans ce travail on a essayé de démontrer qu'on peut remplacer les techniques classiques de l'analyse des aliments par des méthodes modernes bien évoluées, basées sur des capteurs qui peuvent détecter des molécules chimiques parfois mieux même que les systèmes sensoriels humain, en donnant généralement des résultats non linéaires ont besoin d'un système de traitement puissant et vigoureux, qui peut être un logiciel statistique ou un Réseau de neurone artificiel.

Le but de ce projet était de créer un simple réseau de neurone artificiel qui peut identifier une solution chimique et déterminer sa concentration à partir de ses caractéristiques physico-chimiques sans utilisation des réactifs chimiques en réduisant donc le temps d'identification, ainsi que le coût de la procédure.

Ce réseau est le plus simple modèle des réseaux de neurone artificiel, il est de structure multicouche et de type de réseau à une connexion locale, parce que dans lequel chaque neurone est lié à un nombre réduit des neurones de la couche avale.

L'utilisation des capteurs chimiques pour fournir des données était très difficile grâce à son coût très élevés est son indisponibilité au niveau de l'université pour cela on a essayé d'employer l'appareillage qui était disponibles dans les laboratoires pour la réalisation de notre projet.

Liste Bibliographiques

Produced with ScantOPDF

Références bibliographiques

1. Elaine M. Biologie humaine: principes d'anatomie et de physiologie. 8^{ème} édition; p 325, 326, 327.
2. Bonoit Torbiero. Développement de microcapteurs électrochimiques pour l'analyse en phase liquide. Thèse de doctorat. Institut national de Toulouse. 2006.
3. Boudrant J., Corrieu G et Coulet P. Capteurs et mesures en biotechnologie, Lavoisier, 1994. P 34-35, p 59
4. Elias FAYAD. Caractérisations optiques, morphologiques et électriques d'oligoanilines : application pour les capteurs. Thèse de doctorat. spécialité de science des matériaux. 2002. Université de Nantes. Page 35, 36 et 37.
5. Elizabeth A., Jinhe Bai., A. et Sharon Dea. Electronic Noses and Tongues: Applications for the Food and Pharmaceutical Industries , Article scientifique Open access sensors. 2011
6. Encyclopédie Médico-chirurgicale, Physiologie de la gustation 20-490.
7. F. Winqvist., C Krantz, e. I Lundström. Article scientifique, Electronic tongues. mrs bulletin. October 2004. P 3
8. Gérard DREYFUS. Reconnaissance De Formes Par Réseau De Neurones, Ecole Polytechnique. Juillet 2002
9. Golefiowski J *et al.*, De la molécule à l'odeur, Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction, , l'actualité chimique - août-septembre 2005 - n° 289

10. Guillaume hudon, Quantification d'odeur a l'aide du nez electronique et de réseau de neurones artificiels. Mémoire de fin d'étude. Ecole polytechniques de Montréal. 1999
11. Jean-Louis P et Andrei PRIDA., La langue électronique appliquée à la tonnellerie Institut National de la Recherche Agronomique, Montpellier - France., Revue des OEnologies n°109, Nov 2009
12. Jean-Louis. Cours des Microbiologie alimentaire. Université Montpellier II. Département de Sciences et Technologies des Industries Alimentaires septembre 2007. p 1 à 6
13. Larousse médicale, Dessin Michel Saeman. 2006
14. Luidivine F. Contribution à l'utilisation de microcapteurs chimiques à base de micropoutres résonantes pour la détection d'espèces chimiques en milieu gazeux. Thèse de doctorat Université de bordeaux I. 2004. P (23-33)
15. Mariette M. Biostatistique et probabilité exercices, problèmes et épreuves corrigés. édition marketing ellipses S.A. 1996, p 137 et 138
16. Myriam Laurence. Travail sur la qualité produit au sein d'une industrie agro-alimentaire. Thèse de doctorat. université de Toulouse, 2004
17. Nawal Boudaoud., Potentialités d'utilisation du nez électronique à spectromètre de masse pour la caractérisation de la fraction volatile du liège œnologique. Thèse de doctorat. l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 2006; p 17, 18 et 22
18. Nicole. J, Claude. M et Paul. C., Capteurs chimiques et biologique. Laboratoire de Physicochimie des Interfaces de l'École Centrale de Lyon. Page 2 et 3.

19. Philippe AUZOU. Le grand atlas de l'anatomie. Édition philipe auzou, paris. 1997; p54

Les sites web

20. http://gsite.univprovence.fr/gsite/Local/umr_6149/umr/page_perso/Touzet/Le_s_reseaux_de_neurones_artificiels.pdf. Le 05.03.2012
21. <http://tpe-aromes-vanille.e-monsite.com/pages/sommaire/i-la-perception-du-gout.html>. Le 14.02.2012
22. http://www.chusa.jussieu.fr/pedagogie/pcem2/physio/5sens_gout_V3.pdf. 5 sens gout. Le 28.05.2012
23. <http://www.corps.dufouraubin.com/sens/sens.htm>. Le 28.05.2012
24. <http://www.er.uqam.ca/nobel/k15360/senschimiques.pdf>. Le 16.04.2012
25. <http://www.peacritl.fr/V1/uploac/SME4-capteurs-fr.pdf>. Le 01.05.2012
26. http://www.stevia.nec.sitew.com/Effet_gustatif.D.htm#Effet_gustatif.D. le 22.02.2012

Annexe

Produced With ScantOPDF

Matrice de concentration de 0,0875

1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑
0.0881	0.0870	0.0888	0.0833
0.0841	0.0807	0.0894	0.0844
0.0867	0.0838	0.0894	0.0867
0.0867	0.0775	0.0871	0.0884

Matrice de concentration de 0,075

2 ↑	2 ↑	2 ↑	2 ↑
0.0696	0.0745	0.0791	0.0748
0.0764	0.0757	0.0666	0.0722
0.0714	0.0757	0.0728	0.0748
0.0764	1.5079	0.0697	0.0762

Matrice de concentration de 0,0625

3 ↑	3 ↑	3 ↑	3 ↑
0.0642	0.0681	0.0576	0.0573
0.0616	0.0571	0.0627	0.0642
0.0629	0.0603	0.0610	0.0630
0.0616	0.0587	0.0593	0.0596

Matrice de concentration de 0,05

4 ↑	4 ↑	4 ↑	4 ↑
0.0390	0.0517	0.0510	0.0508
0.0550	0.0490	0.0497	0.0477
0.0550	0.0490	0.0536	0.0508
0.0504	0.0507	0.0550	0.0461

Matrice de concentration de 0,0375

5 ↑	5 ↑	5 ↑	5 ↑
0.0367	0.0378	0.0404	0.0252
0.0367	0.0391	0.0387	0.0424
0.0399	0.0431	0.0387	0.0413
0.0367	0.0404	0.0404	0.0367

Matrice de concentration de 0,025

6 ↑	6 ↑	6 ↑	6 ↑
0.0126	0.0301	0.0232	0.0147
0.0426	0.0267	0.0232	0.0257
0.0309	0.0284	0.0272	0.0273
0.0195	0.0250	0.0272	0.0289

Matrice de concentration de 0,0125

- ↑	- ↑	- ↑	- ↑
-0.0009	0.0113	0.0161	0.0023
0.0100	0.0073	0.0079	0.0172
0.0146	0.0100	0.0096	0.0183
0.0147	0.0113	0.0061	0.0126

Figure A □ les matrices de la couche 2

Résumé

Le contrôle de la qualité des aliments était toujours limité aux contrôles microbiologiques et physico-chimiques qui nécessitent beaucoup du matériel et une longue période pour obtenir les résultats.

L'apparence des nouvelles technologies d'analyse de la qualité a réglé ces problèmes. Parmi ces technologies les plus efficaces sont le nez et la langue électroniques; qui simulent les récepteurs olfactifs et gustatifs humain (capteurs du gaz et capteurs des liquides), les systèmes sensoriels humains restent plus complexes ainsi qu'ils contiennent des milliers des récepteurs.

Ces technologies utilisent des capteurs chimiques non spécifiques avec un système de traitement des informations qui est un réseau de neurone artificiel.

L'utilisation d'un réseau de neurone artificiel permet l'identification de type d'une solution chimique et de sa concentration a partir de ses paramètres physico-chimiques (pH, température et conductivité) en utilisant une base des données

Mots clefs: capteur chimique, réseau de neurone artificiel,

Abstract

The food quality control was always limited on microbiological and physicochemical controls that demand a lot of material and a long period to get the results.

The appearances of new quality analysis technologies treat this problem, among these technologies the most effective are the electronic nose and electronic tongue that mimic the human smell and taste sensors (gas and liquid sensors). The human systems are by far the more complex and contain thousands of receptors.

These technologies use non-specific chemic sensors with a data processing system (artificial neural network).

The use of artificial neural network allows the identification of the chemic solution type and it concentration from It physicochemical parameters (pH, temperature and conductivity). By using a data base.

Key words: chemical sensor, artificial neural network

ملحة

إن مراقبة جودة و نوعية الأغذية كانت تقتصر دائما على استعمال التحاليل الميكروبيولوجية و الفيزيوكيميائية التي تحتاج إلى كثير من المعدات و إلى مدة زمنية طويلة لإعطاء النتائج. لكن ظهور تقنيات جديدة عالج هذه السلبيات؛ من أبرز هذه التقنيات ما يسمى بالأنف و اللسان الإلكتروني و سمي بذلك لمحاكتهما لطريقة عمل الأنف و اللسان البشري. بالرغم من أن هذين الأخيرين أكثر تعقيدا و كفاءة بكثير كما أنهما يحتويان على آلاف المستقبلات الحسية.

بينما تستعمل هاتان التقنيتان مستقبلات كيميائية غير مختصة إضافة إلى نظام لمعالجة المعطيات و النتائج. يتمثل هذا النظام في

مشبك عصبي اصطناعي

عمليا يسمح هذا النظام بتحديد نوع محلول كيميائي بالإضافة إلى تركيزه من خلال معطياته الفيزيوكيميائية (درجة الحموضة،

درجة الحرارة و الناقلية الكهربائية) و ذلك بالاستعانة بقاعدة معلومات

الكلمات المفتاحية: مستقبل كيميائي، مشبك عصبي اصطناعي