

SOUS LA DIRECTION DE

**Xavier Fernandez
& Anne-Sylvie Fabiano-Tixier**

LA CHIMIE DES HUILES ESSENTIELLES

Tradition et innovation



- > Marché
- > Extraction
et éco-extraction
- > Caractérisation
- > Propriétés
et applications

La chimie des huiles essentielles

Tradition et innovation

Ouvrage coordonné par Xavier Fernandez et Anne-Sylvie Fabiano-Tixier

Maryline Abert-Vian • Carole André • Sylvain Antoniotti
Sylvie Baudino • Katharina Breme • Charlotte Bringer-Guérin
Jean-Claude Caissard • Aziadé Chemat • Farid Chemat
Tien Do • Camille Dubois • Anne-Sylvie Fabiano-Tixier
Karine Fellous-Marlière • Xavier Fernandez • Sébastien Fiorucci
Hafida Fitah-Sellay • Marie-Christine Grasse • Souleymane Keita
Laurent Legendre • Caroline Micaelli • Hervé Michel
Claude Monin • Nicolas Papaiconomou • Jean-Philippe Paris
Cyrille Santerre • Jérémie Topin • María Viéytez • Julien Zanatta

Chez le même éditeur (en partenariat avec Cosmetic Valley)



Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :
www.deboecksuperieur.com

En couverture :

© Stefan Tomic / Getty Images

Relecture : Jean-Louis Liennard

Couverture : Primo&Primo

Maquette intérieure et mise en page : Jean-Louis Liennard/GraphieProd

Dépôt légal :

Bibliothèque royale de Belgique : 2026/13647/120

Bibliothèque nationale, Paris : août 2026

ISBN : 978-2-8073-7238-2

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2026 - Rue du Bosquet 7, B-1348 Louvain-la-Neuve
De Boeck Supérieur - 5 allée de la 2^e DB, 75015 Paris

Table des matières

Avant-propos	7
--------------------	---

PREMIÈRE PARTIE GÉNÉRALITÉS

La production des huiles essentielles en France

1 Introduction	11
2 La production française d'huiles essentielles ...	12
3 Les fleurs de Grasse	14
4 Conclusion	15

La chimie des substances odorantes

1 Introduction	16
2 Structures des composés odorants	16
3 Les mécanismes de l'olfaction	18
3.1. Le bulbe olfactif, l'organe de la perception des odeurs – 18 ♦	
3.2. La perception des odeurs d'un point de vue moléculaire – 19	
♦ 3.3. Les phénomènes péri-récepteurs – 20 ♦ 3.4. La détection du signal: Les récepteurs olfactifs – 22	
4 Vers la numérisation de l'olfaction	25
4.1. Déorphanisation numérique des récepteurs olfactifs – 25 ♦	
4.2. Prédiction de l'odeur d'une molécule – 25	
5 Conclusion	25

La sécrétion et le stockage des huiles essentielles par les végétaux

1 Introduction	28
2 Compartiments cellulaires de biosynthèse des COV	29

3 Mécanismes de transport des COV au niveau intracellulaire	31
4 Compartiments cellulaires de stockage des COV	32
5 Excrétion des COV au travers de la membrane plasmique et de la paroi cellulaire	33
6 Structures biologiques de stockage extracellulaire des COV	34
7 Conclusion	36

Les voies de biosynthèse des huiles essentielles

1 Introduction	41
2 Voies de synthèse des composés terpéniques volatils	43
3 Voies de synthèse des dérivés volatils des acides gras	50
4 Voies de synthèse des composés aromatiques volatils	53
5 Voies de synthèse des dérivés volatils des acides aminés non-aromatiques	56
6 Voies de synthèse des furanones et pyrones volatils	57
7 Conclusion	57

DEUXIÈME PARTIE L'EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES DE L'ANTIQUITÉ À NOS JOURS

L'extraction des huiles essentielles à travers l'histoire

1 Introduction	63
2 La macération, la décoction, l'enfleurage: les débuts de l'extraction	63

3 La distillation	68
4 Les techniques d'extraction des huiles essentielles d'agrumes	71
5 L'extraction	72

6

Les techniques de distillation des plantes

- 1 Introduction. 77
- 2 Principe de la distillation 77
- 3 Les différentes catégories d'alambics. 78
 - 3.1. Alambics à feu nu – 79 ♦ 3.2. Alambics classiques – 80 ♦
 - 3.3. Les alambics sous pression – 81 ♦ 3.4. Alambics caisson de type menthe pour les grandes cultures – 83 ♦ 3.5. Alambics en continu – 84 ♦ 3.6. Alambic hydrodiffusion – 87 ♦ 3.7. Alambic type « turbodistillateur » – 87
- 4 Cas particulier des huiles essentielles de citrus: essences d'expression 88
- 5 Hydrodistillation sous vide. 89
 - 5.1. Hydrodistillation sous vide et sous micro-ondes – 89 ♦
 - 5.2. Hydrodistillation cyclique sous vide en flash-détente – 90
- 6 Alambics mobiles 90
- 7 Paramètres à prendre en compte pour la distillation des plantes. 91
 - 7.1. Matière première – 91 ♦ 7.2. Optimisation des rendements/qualité de l'huile essentielle selon la matière première – 91 ♦
 - 7.3. Influence des techniques de distillation – 91 ♦ 7.4. Influence du chargement de l'alambic – 92 ♦ 7.5. Influence de la température de condensation – 92 ♦ 7.6. Valeurs caractéristiques moyennes pour un alambic de 3000 litres – 93

7

L'éco-extraction des huiles essentielles: intensification et innovation

- 1 Éco-extraction des huiles essentielles: définition et principes. 94
- 2 Méthodes physiques d'intensification du procédé d'hydrodistillation 95
 - 2.1. Méthodes physiques d'intensification du procédé d'hydrodistillation – 95 ♦ 2.2. Hydrodistillation assistée par chute ohmique – 96 ♦ 2.3. Réduction de consommation énergétique: l'éco-évaporation – 97 ♦ 2.4. Hydrodistillation assistée par ultrasons – 97 ♦ 2.5. Hydrodistillation par chauffage micro-ondes – 98 ♦ 2.6. Entrainement à l'air assisté par micro-ondes (CAMD) – 101 ♦ 2.7. Détente instantanée contrôlée (DIC) – 101
- 3 Procédés chimiques d'intensification de l'hydrodistillation 102
- 4 Le futur des huiles essentielles – Procédés innovants 106
 - 4.1. Hydrodistillation par micro-ondes sous vide pulsé (VMHD) – 106 ♦ 4.2. Extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME) – 108 ♦ 4.3. Hydrodiffusion assistée par micro-ondes et gravité (MHG) – 109 ♦ 4.4. Extraction par CO₂ supercritique: extraits ou huiles essentielles ? – 115
- 5 Conclusion 116

TROISIÈME PARTIE

L'ANALYSE DES HUILES ESSENTIELLES

8

Les analyses physico-chimiques des huiles essentielles

- 1 Introduction. 121
- 2 Mesures pour assurer la sécurité. 122
- 3 Analyses olfactives. 123
- 4 Tests divers. 124
- 5 Mesures physiques. 124
 - 5.1. La densité – 124 ♦ 5.2. L'indice de réfraction – 125 ♦ 5.3. Le pouvoir rotatoire – 126
- 6 Estimation de la concentration d'une classe de composés, les indices. 128
 - 6.1. Détermination de la teneur en eau – Méthode de Karl Fischer – 129 ♦ 6.2. Indice d'acide – 130 ♦ 6.3. Indice d'ester – 130 ♦ 6.4. Indice de carbonyle – 131 ♦ 6.5. Indice d'iode – 131 ♦ 6.6. Indice de peroxyde – 132 ♦ 6.7. Teneur en alcools libres et en alcools totaux – 133 ♦ 6.8. Teneur en phénols – 133
- 7 Mesures spécifiques. 134

9

Les analyses chromatographiques

- 1 Introduction. 136
- 2 La chromatographie en phase gazeuse (GC) . . . 136
 - 2.1. Le chromatographe – 136 ♦ 2.2. Le chromatogramme – 141 ♦
 - 2.3. Analyses quantitatives – 143

- 3 Autres techniques chromatographiques 152
 - 3.1. La chromatographie sur couche mince – 152 ♦ 3.2. La chromatographie liquide – 155

10

Vers la découverte de nouveaux composés. Méthodes modernes d'analyse

- 1 Introduction. 159
- 2 La préparation d'échantillon 160
 - 2.1. Les techniques de l'espace de tête – 160 ♦ 2.2. L'extraction sur phase solide – 161
- 3 Innovations en chromatographie en phase gazeuse. 163
 - 3.1. Chromatographies en phase gazeuse rapide et ultrarapide – 163 ♦ 3.2. Le couplage chromatographie en phase gazeuse-olfactométrie – 163 ♦ 3.3. La chromatographie en phase gazeuse bidimensionnelle (GC-GC et GC×GC) – 168
- 4 Innovations en chromatographie liquide haute performance 170
- 5 La chromatographie par fluides supercritiques. 170
 - 5.1. Les fluides supercritiques – 170 ♦ 5.2. Introduction à la chromatographie en fluides supercritiques (SFC) – 172
- 6 Conclusion 173

QUATRIÈME PARTIE PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS

11

Les applications des huiles essentielles dans le domaine des arômes et parfums

- 1 Parfums et cosmétiques: réglementation et marché179
 - 1.1. Introduction – 179 ♦ 1.2. Définition légale d'un produit cosmétique – 179 ♦ 1.3. Règles de formulation fortement conseillées mais pas obligatoires: le guide de l'IFRA – 182
- 2 Usage des huiles essentielles en parfumerie ...183
- 3 Usage des huiles essentielles en cosmétique...184
 - 3.1. La formulation cosmétique avec les huiles essentielles – 184 ♦ 3.2. Les huiles essentielles, ingrédients aux utilités diverses – 185 ♦ 3.3. Quelle qualité d'huile essentielle choisir – 186
- 4 Le marché pour les parfums et cosmétiques à base d'huiles essentielles186
- 5 Utilisation des huiles essentielles dans le domaine des arômes alimentaires187
 - 5.1. Aspect législatif – 187 ♦ 5.2. Utilisation des huiles essentielles dans les arômes salés – 188 ♦ 5.3. Utilisation des huiles essentielles dans les arômes sucrés – 191 ♦ 5.4. Transformation des huiles essentielles et produits dérivés – 192 ♦ 5.5. Avantages à utiliser des huiles essentielles en formulation d'arômes – 193 ♦ 5.6. Exemples de formulations aromatiques avec des huiles essentielles – 194
- 6 Conclusions et perspectives194

12

Les activités chimiques et biologiques des huiles essentielles

- 1 Introduction.....197
- 2 Comment évaluer les propriétés chimiques et biologiques des huiles essentielles198
 - 2.1. Avant tout: caractériser la nature chimique des huiles essentielles – 198 ♦ 2.2. Les grandes familles de tests d'activités appliquées aux huiles essentielles – 199
- 3 Applications211
 - 3.1. Applications des activités antioxydantes des huiles essentielles – 211 ♦ 3.2. Applications des activités antimicrobiennes des huiles essentielles – 214 ♦ 3.3. Applications des activités de biocontrôle – 217
- 4 Conclusion222

13

Les huiles essentielles comme ingrédients pour une chimie «verte»

- 1 Introduction.....227
 - 1.1. Composition des huiles essentielles – 227 ♦ 1.2. Métabolisme primaire et secondaire – 227 ♦ 1.3. Synthèse organique et pétrochimie – 228
- 2 Synthèse organique et chimie verte.....228
 - 2.1. Chimie verte – 228 ♦ 2.2. Hémisynthèse – 230 ♦ 2.3. Commodités vs chimie fine – 230
- 3 Sources pour la chimie de base à gros volumes230
- 4 Chimie fine233
 - 4.1. Citral – 233 ♦ 4.2. Valencène – 233 ♦ 4.3. Pulégone – 234 ♦ 4.4. Népétalactone – 235 ♦ 4.5. Dérivés phénoliques – 236 ♦ 4.6. Carotol – 236 ♦ 4.7. Linalol – 236
- 5 Les huiles essentielles comme agrosolvants utilisés dans l'extraction de substances naturelles.....239
 - 5.1. Évaluation physico-chimique – 241 ♦ 5.2. Extraction des huiles et graisses – 244 ♦ 5.3. Extraction de l'eau intrinsèque – 247 ♦ 5.4. Extraction des colorants – 249 ♦ 5.5. Solvants eutectiques naturels à base de terpène – 250 ♦ 5.6. Utilisation des terpènes d'huiles essentielles comme agrosolvants – 251
- 6 Conclusion252

14

Se former à la chimie des huiles essentielles

- 1 Extraction d'huiles essentielles257
- 2 Le contrôle analytique259
 - 2.1. L'analyse olfactive – 260 ♦ 2.2. Analyses chromatographiques – 261
- 3 Utilisation des huiles essentielles267
 - 3.1. Applications en parfumerie – 267 ♦ 3.2. Applications en cosmétique – 268
- 4 Conclusion272

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES à voir en fin de chaque chapitre, aux pages 15, 26, 36, 59, 75, 93, 116, 134, 157, 174, 195, 223, 253 et 272.

Liste des acronymes

Nous donnons la signification de l'acronyme anglais et sa traduction.

ABTS, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) : acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)

AECA, *Aroma Extract Concentration Analysis* : analyse par concentrations de l'extrait aromatisant

AED, *Atomic Emission Detector* : détecteur à émission atomique

AEDA, *Aroma Extract Dilution Analysis* : analyse par dilutions de l'extrait aromatisant

AFNOR : Association française de normalisation

BHA, *Butylated HydroxyAnisole* : hydroxyanisole butylé

BHT, *Butylated HydroxyToluene* : hydroxytoluène butylé

BOSS, *Buccal Odour Screening System* : système de dépistage de l'odeur en bouche

CCM : chromatographie sur couche mince

CHARM, *Combined Hedonic Aroma Response Measurement* : mesure de l'occurrence du plaisir d'une réponse aromatique ou mesure de l'occurrence de la réponse aromatique

CIHEF : Comité interprofessionnel des Huiles essentielles françaises

CRIEPPAM : Centre régionalisé interprofessionnel d'Expérimentation en plantes à parfum aromatiques et médicinales

CTAB, *CetylTrimethylAmmonium Bromide* : bromure de cetyltriméthylammonium

CUPRAC, *CUPric Reducing Antioxidant Capacity* : capacité antioxydante réductrice du cuivre

DES, *Deep Eutectic Solvents* : solvants eutectiques profonds

DHS, *Dynamic Headspace* : espace de tête dynamique

DIC : détente instantanée contrôlée

DMSO, *Dimethyl Sulfoxide* : diméthylsulfoxyde

DPPH, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle

ECD, *Electron Capture Detector* : détecteur à capture d'électrons

EI, *Electronic Ionization* : ionisation électronique

EMX : enzyme du métabolisme des xénobiotiques

EPC, *Electronic Pressure Control* : contrôle électronique de la pression

FALGPA, N-[3-(2-furyl)acryloyl]-L-leucyl-glycyl-L-prolyl-L-alanine

FD, *Flavour Dilution* : facteur de dilution

FDA, *Food and Drug Administration* : Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux

FID, *Flame Ionization Detector* : détecteur à ionisation de flamme

FPD, *Flame Photometric Detector* : détecteur à photométrie de flamme

FRAP, *Ferric Reducing Antioxidant Power* : capacité de réduction ferrique

FSCM, *Finger-Span Cross Modality Matching* : intégration de l'intensité odorante par écartement des doigts

GC, *Gas Chromatography* : chromatographie en phase gazeuse

GC/FID, *Gas Chromatography/Flame ionization detector* : couplage chromatographie en phase gazeuse-détecteur à ionisation de flamme

GC-GC : chromatographie à deux dimensions par «Heart-cutting»

GC×GC : chromatographie bidimensionnelle intégrale

GC-MS, *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* : couplage chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse

GC-O, *Gas Chromatography/Olfactometry* : couplage chromatographie en phase gazeuse-olfactométrie

GRAS, *Generally Recognized As Safe* : généralement reconnu comme sans danger

HAT, *Hydrogen Atom Transfer* : transfert d'atome d'hydrogène

HPLC, *High-Performance Liquid Chromatography* : chromatographie liquide à haute performance

HPTLC, *High-Performance Thin Layer Chromatography* : chromatographie sur couche mince à haute performance

HR, *High Resolution* : haute résolution

HSME, *HeadSpace Microdrop Extraction* : extraction par microgoutte de l'espace de tête

HS-SPME, *HeadSpace Solid Phase MicroExtraction* : microextraction sur phase solide dans l'espace de tête

HSSE, *HeadSpace Sorptive Extraction* : extraction de l'espace de tête par phase solide

IGP : indication géographique protégée

INAO : Institut national de l'origine et de la qualité

IR : infrarouge

ISO, *International Organization for Standardization* : Organisation internationale de normalisation

ITEX, *In-Tube Extraction* : extraction dans l'aiguille

L-DOPA, 3,4-Dihydroxy-L-phenylalanine : 3,4-dihydroxy-L-phénylalanine

LI : liquide ionique

LMCS, *Longitudinally Modulated Cryogenic System* : système cryogénique de modulation longitudinale

MS, *Mass Spectrometry* : spectrométrie de masse

NADES, *Natural Deep Eutectic Solvents* : solvants eutectiques profonds naturels

NCD, *Nitrogen Chemiluminescence Detector* : détecteur d'azote à chimiluminescence

NTD, *Needle Trap Device* : système de piégeage dans l'aiguille

OAHD, *Ohmic-Assisted HydroDistillation* : hydrodistillation assistée par chauffage ohmique

OASIS, *Original Aroma Simultaneously Input to the Sniffing port* : alimentation simultanée du port sniffing avec l'arôme d'origine

OAV, *Odour Activity Value* : valeur d'activité odorante

OBP, *Odorant-Binding Protein* : protéine de liaison aux odorants

OCDE, *Organisation for Economic Co-operation and Development* : Organisation de coopération et de développement économiques

ONIPPAM : Office national interprofessionnel des plantes à parfum, aromatiques et médicinales

ORAC, *Oxygen Radical Absorbance Capacity* : capacité d'absorption des radicaux oxygénés

OSME, *Odour Specific Magnitude Estimation* : estimation de l'intensité spécifique d'une odeur

PDMS, *PolyDiMethylSiloxane* : polydiméthylsiloxane

PEG, *PolyEthylene Glycol* : polyéthylène glycol

PFPD, *Pulsed Flame Photometric Detector* : détecteur à photométrie de flamme pulsée

PPAM : plantes à parfum, aromatiques et médicinales

PTV, *Programmable Temperature Vaporizer* : injecteur à température programmable de vaporisation

QMS, *quadrupole Mass Spectrometer* : spectromètre de masse quadripolaire

RCPG : récepteur couplé à des protéines G

RhE, *Reconstructed Human Epidermis* : modèles de peau humaine reconstruite

RI, *Retention Index* : indice de rétention

RO : récepteur olfactif

ROS, *Reactive Oxygen Species* : espèce réactive de l'oxygène

SCD, *Sulfur Chemiluminescence Detector* : détecteur de soufre à chimiluminescence

SET, *Single Electron Transfer* : transfert d'électron

SHS, *Static Headspace* : espace de tête statique

SIDA, *Stable Isotope Dilution Analysis* : analyse par dilution isotopique stable

(S)NIF, *(Surface) Nasal Impact Frequency* : fréquence d'impact nasal (de surface)

SPE, *Solid Phase Extraction* : extraction sur phase solide

SPME, *Solid Phase MicroExtraction* : microextraction sur phase solide

SSL, *Split/Splitless* : injecteur avec ou sans division

TBARS, *Thiobarbituric Acid Reactive Substances* : substances réagissant avec l'acide thiobarbiturique

TIM, *Time-Intensity Method* : méthode temps-intensité

TOFMS, *Time-Of-Flight Mass Spectrometer* : spectromètre de masse à temps de vol

TOS, *Total Olfactory Signal* : signal olfactif total

TSD, *Thermoionic Specific Detector* : détecteur thermoionique spécifique

UAE, *Ultrasound Assisted Extraction* : extraction assistée par ultrasons

uma : unité de masse atomique

VIDEO-Sniff, *Vocabulary-Intensity-Duration of Elementary Odours perceived by Sniffing* : durée, intensité et vocabulaire d'odeurs élémentaires perçues par sniffing

Avant-propos

Utilisées depuis des siècles pour leurs propriétés odorantes, thérapeutiques ou rituelles, les huiles essentielles sont désormais au cœur de nombreux secteurs : arômes alimentaires, parfumerie, cosmétique, pharmacie, compléments alimentaires, biocontrôle et, plus largement, bioéconomie. Derrière leur image de produits naturels se cachent pourtant des mélanges moléculaires d'une grande complexité, dont la compréhension exige une solide maîtrise de la chimie.

En France, la filière des huiles essentielles illustre parfaitement la rencontre entre patrimoine et modernité. En 2025, bien que les volumes de production ne placent pas le pays parmi les premiers producteurs mondiaux, les huiles essentielles françaises bénéficient d'une reconnaissance internationale fondée sur leur qualité, leur traçabilité et l'excellence des savoir-faire. Des lavandes et lavandins de Provence aux menthes, camomilles ou pins maritimes, cette richesse botanique est aujourd'hui valorisée grâce à des pratiques conciliant performance, durabilité et innovation.

L'objectif de cet ouvrage est de proposer une vision scientifique, rigoureuse et actualisée de la chimie des huiles essentielles, depuis leur histoire et leurs procédés d'obtention jusqu'à leur caractérisation chimique, leur analyse, leurs propriétés biologiques et leurs applications industrielles. Les huiles essentielles ne sont pas de simples extraits végétaux : elles constituent des assemblages complexes de dizaines, parfois de centaines de molécules dont la structure, la réactivité et les interactions conditionnent les propriétés olfactives, biologiques, toxicologiques et technologiques.

Comprendre cette complexité est aujourd'hui indispensable. La qualité d'une huile essentielle dépend de son origine botanique, de son chémotype, de son terroir, des conditions culturales, des méthodes d'extraction et de conservation. Son contrôle mobilise des outils analytiques de plus en plus performants, capables de détecter des composés présents à l'état de traces, de garantir son authenticité et de répondre à des exigences réglementaires toujours plus strictes.

Cet ouvrage s'adresse aux professionnels des filières des arômes, parfums, cosmétiques, pharmacie, compléments alimentaires, biocontrôle et analyses, ainsi qu'aux étudiants souhaitant acquérir une compréhension approfondie des fondements chimiques des huiles essentielles. Son ambition n'est pas seulement de transmettre des connaissances, mais également de proposer un langage scientifique commun favorisant les échanges entre producteurs, formulateurs, chercheurs, analystes, enseignants et industriels.

À travers les différents chapitres, le lecteur découvrira comment la chimie permet d'expliquer la diversité des huiles essentielles, d'en maîtriser la production, d'en garantir la qualité et d'en comprendre les activités biologiques. Plus qu'un simple ouvrage de chimie, ce livre se veut un outil au service d'une utilisation raisonnée, durable et innovante des huiles essentielles, dans un contexte où les attentes sociétales, les avancées scientifiques et les enjeux environnementaux n'ont jamais été aussi étroitement liés.

Remerciements

Nous souhaitons, avant toute chose, dédier cet ouvrage à la mémoire du Professeur Farid Chemat, notre ami, notre collègue et un chercheur d'exception. Il a été l'un des piliers de la première édition de ce livre et un compagnon essentiel de cette aventure scientifique et humaine. Travailler à une nouvelle édition sans lui a été une épreuve, tant sa présence intellectuelle, son enthousiasme et sa vision novatrice nous accompagnaient à chaque étape. À mesure que les chapitres prenaient forme, ils nous rappelaient combien il nous manquait, et combien son absence est une perte immense pour le monde de la chimie verte et des huiles essentielles. Son héritage scientifique et humain continue cependant d'inspirer nos travaux et ceux de toute une communauté.

Nous adressons ensuite nos plus vifs remerciements aux auteurs des différents chapitres. Malgré leurs nombreux engagements académiques et professionnels, ils ont répondu avec générosité et rigueur à notre proposition, apportant leur expertise, leur sens critique et leur passion. Grâce à eux, cet ouvrage reflète la diversité, la richesse et l'exigence scientifique du domaine des huiles essentielles.

Ce livre n'aurait pu voir le jour sans le soutien de nombreux acteurs majeurs du monde des plantes aromatiques et médicinales et de leurs huiles essentielles. Nous remercions tout particulièrement le Syndicat professionnel national des matières premières pour la parfumerie, les arômes alimentaires et les cosmétiques (PRODAROM), le Syndicat national des Ingrédients aromatiques (SNIAA), ainsi que le Comité interprofessionnel des Huiles essentielles françaises (CIHEF), pour leur engagement constant en faveur de la filière.

Nos remerciements s'adressent également à l'Université Côte d'Azur, et plus spécifiquement à l'Institut de Chimie de Nice (ICN) ainsi qu'au Master professionnel Chimie Formulation, Analyse, Qualité (FOQUAL), pour leur soutien scientifique et pédagogique. Nous remercions la Chaire UNESCO Chimie Verte et Durable du Végétal et la Chaire partenariale Patrimoine Arômes, Parfums et Cosmétiques en Pays de Grasse, dont les travaux et les valeurs font profondément écho à l'esprit de cet ouvrage.

Nous exprimons aussi notre gratitude à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (désormais Avignon Université), et à l'UMR 408 INRAE-UAPV, ainsi qu'à FranceAgriMer, établissement national de l'agriculture et de la mer, pour leur accompagnement et leur confiance.

Nous tenons à remercier très chaleureusement notre éditeur De Boeck, et tout particulièrement Alain Luguët, pour nous avoir offert l'opportunité de travailler sur ce projet ambitieux et pour la qualité de nos échanges, toujours stimulants et constructifs.

Enfin, nous remercions le Musée international de la Parfumerie de Grasse pour nous avoir permis d'utiliser certaines de leurs photographies et illustrations, qui enrichissent et incarnent cet ouvrage.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cette aventure scientifique et éditoriale : merci.

Les auteurs

Généralités

Marché, physiologie de l'olfaction, biosynthèse des huiles essentielles

© Getty Images

Sommaire

1

La production des huiles essentielles en France

1	Introduction.....	11
2	La production française d'huiles essentielles ..	12
3	Les fleurs de Grasse.....	14
4	Conclusion	15

2

La chimie des substances odorantes

1	Introduction.....	16
2	Structures des composés odorants.....	16
3	Les mécanismes de l'olfaction.....	18
4	Vers la numérisation de l'olfaction.....	25
5	Conclusion	25

3

La sécrétion et le stockage des huiles essentielles par les végétaux

1	Introduction.....	26
2	Compartiments cellulaires de biosynthèse des COV	29

3	Mécanismes de transport des COV au niveau intracellulaire.....	31
4	Compartiments cellulaires de stockage des COV	32
5	Excrétion des COV au travers de la membrane plasmique et de la paroi cellulaire	33
6	Structures biologiques de stockage extracellulaire des COV	34
7	Conclusion	36

4

Les voies de biosynthèse des huiles essentielles

1	Introduction.....	41
2	Voies de synthèse des composés terpéniques volatils	43
3	Voies de synthèse des dérivés volatils des acides gras.....	50
4	Voies de synthèse des composés aromatiques volatils	53
5	Voies de synthèse des dérivés volatils des acides aminés non-aromatiques.....	56
6	Voies de synthèse des furanones et pyrones volatils.....	57
7	Conclusion	57

Les auteurs

- **Sylvie Baudino**

Docteur en Chimie, HDR, Professeure des Universités
Laboratoire de Biotechnologies végétales appliquées
aux Plantes aromatiques et médicinales (LBVpam),
UPRES EA 3061, Université Jean Monnet de l'Université
de Lyon, Faculté des Sciences et Techniques,
23 rue du Docteur Paul Michelon,
42023 Saint-Étienne Cedex 2
(<https://lbvpam.univ-st-etienne.fr/fr/index.html>)

- **Charlotte Bringer-Guérin**

Ingénieur chimiste, responsable des affaires
réglementaires CIHEF (Comité interprofessionnel
des Huiles essentielles françaises)
Comité interprofessionnel des Huiles essentielles françaises,
271 impasse Gustave Fenoul, 04100 Manosque
(<https://cihef.org/>)
charlotte.bringer-guerin@cihef.org

- **Jean-Claude Caissard**

Docteur en Chimie, HDR, Maître de conférences
Laboratoire de Biotechnologies végétales appliquées
aux Plantes aromatiques et médicinales (LBVpam),
UPRES EA 3061, Université Jean Monnet de l'Université
de Lyon, Faculté des Sciences et Techniques,
23 rue du Docteur Paul Michelon,
42023 Saint-Étienne Cedex 2
(<https://lbvpam.univ-st-etienne.fr/fr/index.html>)

- **Xavier Fernandez**

Docteur en Chimie, HDR, Professeur des Universités
Institut de Chimie de Nice (ICN), UMR7272, Université Côte
d'Azur, CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2
(<https://icn.univ-cotedazur.fr>)
xavier.fernandez@univ-cotedazur.fr

- **Sébastien Fiorucci**

Docteur en Chimie, HDR, Maître de conférences
Institut de Chimie de Nice (ICN), UMR7272, Université Côte
d'Azur, CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2
(<https://icn.univ-cotedazur.fr>)
sebastien.fiorucci@univ-cotedazur.fr

- **Laurent Legendre**

Docteur en Chimie, Professeur des Universités
INRAE, UR 1115 Plantes et systèmes de culture horticoles,
Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

- **Jérémie Topin**

Docteur en Chimie, HDR, Maître de conférences
Institut de Chimie de Nice (ICN), UMR7272, Université Côte
d'Azur, CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2
(<https://icn.univ-cotedazur.fr/>)
jeremie.topin@univ-cotedazur.fr

- **Julien Zanatta**

Ingénieur agronome, Chargé d'études Plantes à parfum,
aromatiques et médicinales (PPAM)
FranceAgriMer, Délégation nationale de Volx,
25 rue du Maréchal Foch, BP 8, 04130 Volx
(<https://www.franceagrimer.fr/accueil>)
julien.zanatta@franceagrimer.fr

La production des huiles essentielles en France

Julien Zanatta, Charlotte Bringer-Guérin, Xavier Fernandez

1 Introduction

En 2025, la production d'huiles essentielles en France s'affirme comme un secteur à la croisée de la tradition et de l'innovation. Héritière d'un savoir-faire ancestral, cette filière conjugue aujourd'hui exigences de qualité, enjeux environnementaux et valorisation des terroirs. Des lavandes et lavandins de Provence aux menthes poivrées, en passant par les cultures de camomille ou de pin maritime, la diversité botanique française confère à ses huiles essentielles une réputation mondiale. Face à la demande croissante pour des produits naturels et

traçables, les producteurs adoptent des pratiques plus durables : distillation économe en énergie, agriculture biologique, circuits courts... Soutenue par la recherche et les politiques publiques, la filière s'adapte aux défis climatiques et économiques, redéfinissant le rôle des huiles essentielles comme acteurs clés de la bioéconomie française [1].

Même si les volumes mondiaux produits (tableau 1.1) ne placent pas la France parmi les leaders, la qualité des huiles essentielles françaises est souvent mise en avant [2].

Huile essentielle	Quantités (t)	Pays producteurs
Orange douce	49000	États-Unis, Brésil, Dominique
Menthe des champs (<i>Mentha arvensis</i>)	42000	Inde, Chine, Brésil
Citron	9000	Argentine, Italie, États-Unis
<i>Eucalyptus globulus</i>	4000	Chine, Inde, Australie
Menthe poivrée	3500	États-Unis, Inde
Citronnelle	3000	Chine, Indonésie, Inde
Clou de girofle	2500	Madagascar, Indonésie, Tanzanie
Menthe douce/verte	2000	États-Unis, Inde, Chine
Lavandin	1700	France, Espagne
Patchouli	1400	Indonésie, Chine, Malaisie
Lime	1000	Mexique, Pérou, États-Unis
Lavande	800	Bulgarie, France
Muscade	400	États-Unis, Indonésie, Sri Lanka
Pamplemousse	400	Israël, Brésil, États-Unis
Cannelle écorce	400	Chine, Indonésie
Tea Tree	400	Australie

Tableau 1.1. Liste des huiles essentielles les plus produites dans le monde en 2019 et principaux pays producteurs.

Source : Estimations FranceAgrimer d'après une enquête auprès d'experts

Ce petit chapitre introductif propose une vision d'ensemble de la production française d'huiles essentielles.

2 La production française d'huiles essentielles

La filière des plantes à parfum, aromatiques et médicinales (PPAM) en France englobe d'une part la culture (sur 69 200 ha en 2024; fig. 1.1) et la cueillette régulière d'une multitude d'espèces de plantes, d'autre part la commercialisation d'un très grand nombre de produits, dont les huiles essentielles [3].

Les surfaces consacrées à la production d'huiles essentielles couvrent environ la moitié des superficies implantées en PPAM en France et sont en grande partie localisées dans le Sud-Est, où prédominent le lavandin, la lavande, la sauge sclarée et l'hélichryse.

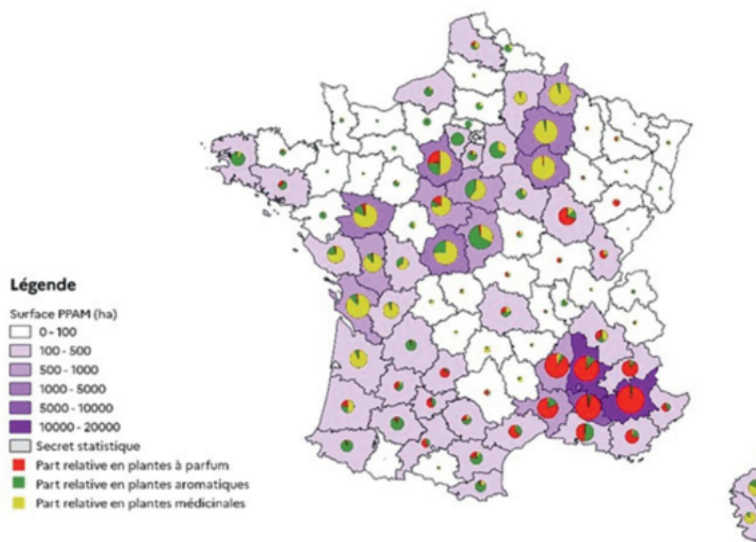


Figure 1.1. Surfaces de production de PPAM en France.

Source : FranceAgriMer d'après les données d'Agreste, Recensement agricole 2020

► La lavande et le lavandin

En 2024, les productions françaises d'huiles essentielles de lavande et de lavandin sont respectivement de 78 tonnes et de 1 650 tonnes pour des surfaces déclarées de 27 500 hectares (7 600 pour la lavande et 19 900 pour le lavandin), réparties entre 2 130 exploitations. La production issue de la cueillette sauvage reste très minoritaire. Ces cultures se sont en effet fortement développées durant la dernière décennie en raison d'une demande accrue en huiles essentielles qui a entraîné une hausse, non seulement de leur rentabilité, mais aussi de leur intérêt agronomique, dans des conditions pédoclimatiques difficiles, vis-à-vis d'autres spéculations agricoles.

L'augmentation des surfaces ne s'est pas limitée aux grands bassins de production du Sud-Est; elle a également concerné leur périphérie ainsi que

de nouveaux secteurs, où ces cultures n'étaient jusque-là pas présentes. Les volumes d'huile essentielle produits ont alors atteint des records avec, en 2020 et 2021, 2 100 tonnes de lavandin et plus de 150 tonnes de lavande (fig. 1.2). Cependant,



Figure 1.2. Évolution de la production française d'huile essentielle de lavandin de 2000 à 2024.

Sources : ONIPPAM et FranceAgriMer de 2000 à 2013; CIHEF de 2014 à 2024

depuis 2022, les productions ont chuté en raison d'une baisse des surfaces consécutive à la situation des marchés (contexte de surproduction et de concurrences accrues) mais aussi des conditions de production de plus en plus difficiles (aléas climatiques et attaques de ravageurs).

La lavande et le lavandin sont des plantes emblématiques de la Provence et font partie intégrante de l'identité de cette région. Les acteurs de la filière ont constitué en décembre 2023 une association «La Maison du Patrimoine culturel lavandicole de Provence» dont l'objet est de porter la candidature des paysages de lavande au patrimoine mondial de l'Unesco. Cette démarche rassemble les acteurs liés à la production de lavande et de lavandin et à son territoire historique afin de préserver, défendre et valoriser ce patrimoine culturel.

À partir de 2022, la production d'huile essentielle de lavandin chute après avoir atteint un record en 2021. Durant cette période, la production d'huile essentielle de lavande a été divisée par deux (entre 2020 et 2024; fig. 1.3).

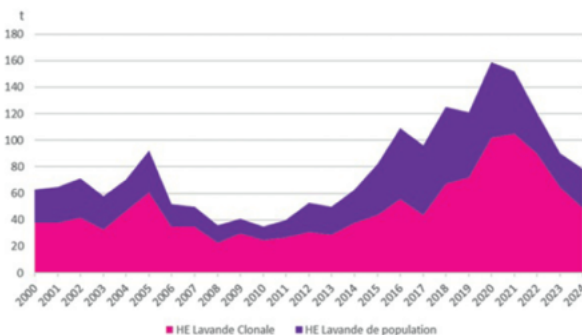


Figure 1.3. Évolution de la production française d'huile essentielle de lavande de 2000 à 2024.

Sources : ONIPPAM et FranceAgriMer de 2000 à 2013 ; CIHEF de 2014 à 2024

L'appellation d'origine protégée (AOP) «Huile essentielle de Lavande de Haute-Provence», mise en place par l'Association des Producteurs d'huile essentielle de Lavande AOP de Haute-Provence (APAL), a été reconnue par l'INAO en 1981 afin de garantir l'origine et de distinguer l'huile essen-

tielle issue de lavandes de population (multiplication par semis). L'aire géographique de l'AOP est limitée à certaines communes des départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes, de la Drôme et du Vaucluse.

En 2024, une cinquantaine de producteurs et distillateurs sont engagés dans la démarche, pour une surface potentielle de production d'environ 1 500 ha. La quantité d'huile essentielle AOP Lavande de Haute-Provence certifiée en 2024 est de 9,4 tonnes, soit seulement 32 % de la production nationale de lavande de population.

► La sauge sclarée

Troisième plante à parfum la plus cultivée en France, la sauge sclarée est localisée essentiellement dans le Sud-Est (Alpes-de-Haute-Provence, Vaucluse et Drôme). Cette culture a plus que doublé entre 2010 et 2020, année où, selon le recensement agricole (donnée la plus récente), la sauge sclarée était implantée dans environ 900 exploitations et sur une surface totale de 2 850 ha. La production d'huile essentielle était estimée à 30 tonnes [4].

► Hélichryse italienne (ou immortelle)

L'hélichryse italienne (*Helichrysum italicum*) est présente de manière spontanée dans les territoires du pourtour méditerranéen. Très dense en Corse, sa cueillette y a favorisé les premières productions d'huile essentielle. Par la suite, face au déclin de la ressource naturelle et dans le souci de la préserver, la plante a été mise en culture. Elle s'est alors répandue sur le continent, dans le Sud de la France, rendant la cueillette aujourd'hui très minoritaire. En 2020 (donnée la plus récente), 1 050 ha d'hélichryse ont été recensés dont une moitié en Corse et l'autre moitié en France continentale (notamment Alpes-de-Haute-Provence, Vaucluse et Drôme) [3]. Il a été également dénombré 600 exploitations productrices, dont 80 en Corse.

En 2024, l'Association des Producteurs d'huiles essentielles de Corse (APROHEC) a déposé auprès de l'INAO une demande de reconnaissance en IGP «Huile essentielle d'Immortelle de Corse».

Cette démarche vise à faire reconnaître les qualités spécifiques de l'huile essentielle de ce territoire et de protéger son origine.

► Les autres huiles essentielles

La France produit également de l'huile essentielle à partir du fenouil amer, principalement en Provence-Alpes-Côte d'Azur et en Normandie, à destination de la fabrication de boissons alcoolisées anisées. Il y a également l'huile essentielle française de camomille romaine qui provient principalement

de la vallée de la Loire. D'autres plantes sont aussi cultivées et cueillies pour la production d'huile essentielle telles que le thym, l'hysope, la mélisse, la sauge officinale, le romarin, le cyprès, la sarriette, l'estragon, etc.

La production d'huiles essentielles françaises ne se situe pas uniquement en métropole. L'île de La Réunion est réputée pour ses huiles essentielles de géranium et de vétiver. C'est aussi à Mayotte qu'est élaborée celle d'ylang-ylang.

3 Les fleurs de Grasse

Le Pays de Grasse, mondialement connu pour ses plantes à parfum, a vu inscrire en 2018 ses savoir-faire au patrimoine culturel immatériel de l'humanité de l'Unesco. Cette distinction souligne l'importance historique de la région dans la culture de plantes emblématiques qui sont au cœur de l'industrie de la parfumerie.

Les plantes grasseises, parmi lesquelles le jasmin, la rose centifolia, la violette, la fleur d'oranger ou encore la tubéreuse, sont très peu exploitées pour produire des huiles essentielles et font surtout l'objet de processus d'extraction par des solvants volatils permettant la production de concrètes et d'absolues, matières odorantes hautement concentrées et utilisées dans la fabrication des parfums [4].

Si la demande envers ces extraits des grandes maisons de la parfumerie reste croissante, deux défis majeurs freinent l'expansion de la production : d'une part, l'accès au foncier qui rend difficile l'augmentation des surfaces ; d'autre part, les conditions climatiques défavorables qui compromettent de plus en plus fréquemment les récoltes (tableau 1.2). À ces difficultés s'ajoute la concurrence accrue issue de matières premières soit synthétiques, soit importées. Afin de préserver les productions et le savoir-faire ancestral qui fait la renommée mondiale de Grasse, l'Association de producteurs «Fleurs d'exception du Pays de Grasse» a obtenu en 2020 la reconnaissance en tant qu'indication géographique (IG) «Absolue Pays de Grasse».

Plantes	Volume (t)						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Fleur d'oranger (fleur fraîche)	5,3	4,1	5,1	ND	5,0	5,0	5,0
Rose centifolia (fleur fraîche)	100	100	80	ND	104	118	95
Violette (feuille)	46	41	30	42	43	50	53
Jasmin (fleur fraîche)	13	14	14	ND	14	10	12
Mimosa sauvage (fleur fraîche)	89	90	90	78	87	113	95
Tubéreuse (fleur fraîche)	0,2	0,2	0,2	ND	3,6	2,8	3,7

Tableau 1.2. Évolution des productions de quelques plantes à parfum grasseises pour l'industrie de la parfumerie de 2018 à 2024.

ND : donnée non disponible

Source : Enquête FranceAgriMer auprès des premiers acheteurs

4 Conclusion

La production française d'huiles essentielles s'affirme comme un pilier dynamique de la bioéconomie nationale actuelle, à la fois ancré dans son patrimoine et tourné vers l'avenir. De la lavande de Haute-Provence à l'hélichryse corse, la diversité des plantes cultivées illustre la richesse botanique et territoriale du pays. Malgré les difficultés récentes (aléas climatiques, ravageurs, fluctuations du marché), la filière a su démontrer sa résilience et sa capacité d'adaptation. Les producteurs ont renforcé leurs pratiques durables, privilégiant l'agriculture biologique, la traçabilité et la valorisation locale, tout en s'appuyant sur la recherche et l'innovation pour améliorer la qualité des huiles et réduire l'empreinte environnementale des procédés.

Les démarches de reconnaissance en appellation d'origine protégée (AOP) ou indication géo-

graphique protégée (IGP), comme celles engagées pour la lavande de Haute-Provence ou l'immortelle de Corse, participent à cette dynamique en associant excellence, authenticité et durabilité. Ces initiatives contribuent aussi à préserver les paysages emblématiques et les savoir-faire ruraux, tout en consolidant l'image d'excellence de la France sur le marché mondial des huiles essentielles.

L'avenir de la filière dépendra de sa capacité à relever les défis du changement climatique, de la normalisation internationale et de la régulation des marchés. Mais les perspectives demeurent prometteuses : la demande croissante en produits naturels, les avancées dans la distillation économe en énergie, la recherche de nouvelles espèces aromatiques et l'intégration dans les filières cosmétiques, pharmaceutiques et alimentaires ouvrent des horizons durables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] X. Fernandez, C. André, A. Casale, F. Chemat, T. Do & M. Vian, *Le grand guide des huiles essentielles & hydrolats & huiles végétales. Propriétés et utilisation*, De Boeck Supérieur, 2024.
- [2] Businesscoot, «Le marché des huiles essentielles (France)», mise à jour : 20-09-2021.
- [3] FranceAgriMer, «Panorama 2024. Marché des PPAM», 2025.
<https://www.franceagrimer.fr/chiffre-et-analyses-economiques/panorama-des-marches-des-ppam>
- [4] FranceAgriMer, «Filière des plantes à parfum, aromatiques et médicinales. Recensement agricole 2020», 2023
https://www.franceagrimer.fr/sites/default/files/rdd/documents/RA2020_PPAM_2.pdf (consulté le 21-07-2024).

2

La chimie des substances odorantes

Xavier Fernandez, Sébastien Fiorucci, Jérémie Topin

1 Introduction

Les huiles essentielles sont des mélanges particulièrement complexes de composés organiques d'origine naturelle. À l'exception notable de celles obtenues par expression mécanique (agrumes), elles sont majoritairement constituées de molécules volatiles à l'origine de leur odeur particulière.

L'objectif de ce chapitre est double. Dans un premier temps, il s'agira de passer en revue la diversité chimique et structurale qui caractérise

les molécules odorantes présentes dans les huiles essentielles. Dans un second temps, seront abordés les mécanismes moléculaires et physiologiques qui nous permettent de percevoir une odeur. Bien que notre odorat soit quotidiennement sollicité, les phénomènes moléculaires de la reconnaissance des odorants ne sont encore que partiellement élucidés et continuent de faire l'objet de recherches intensives.

2 Structures des composés odorants

De nouvelles substances odorantes sont continuellement identifiées et exploitées par l'industrie de la parfumerie des arômes, des cosmétiques et de l'aromathérapie. Les molécules odorantes présentent une grande diversité en termes de fonctions chimiques ou de structure. Des recherches récentes menées par Mayhew et ses collègues ont tenté de définir l'espace chimique des molécules odorantes à l'aide de techniques d'apprentissage automatique [1]. Leur modèle, entraîné sur des molécules odorantes précédemment identifiées, suggère que le transport dans l'environnement est la caractéristique la plus importante qu'une molécule doit posséder pour déclencher une perception olfactive. En analysant une base de données de 166 milliards de composés

chimiques, leurs modèles ont prédit qu'il existe au moins 40 milliards de composés odorants potentiels! À ce jour, seulement quelques milliers de molécules ont été caractérisées olfactivement, ce qui indique que la recherche de nouveaux odorants est une activité d'avenir.

La création de structures chimiques nouvelles, à l'origine d'odeurs présentant un certain intérêt industriel, reste toutefois guidée par la sérendipité (découverte par chance). En effet, la majorité des relations structure-odeur demeure inconnue. On observe que des structures chimiques très différentes peuvent conduire à des perceptions quasi identiques, alors que des structures très similaires peuvent déclencher des sensations olfactives très éloignées (tableau 2.1).

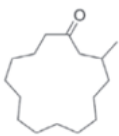
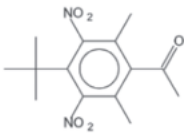
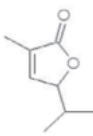
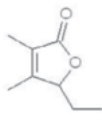
			
androsténol <i>musc</i>	musk cétone <i>musc</i>	isopropyl-méthyl-furanone <i>herbacée</i>	éthyl-diméthyl-furanone <i>épicee</i>

Tableau 2.1. Structures chimiques et leur odeur perçue.

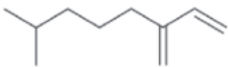
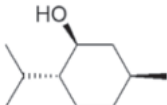
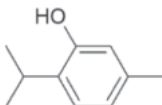
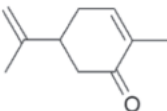
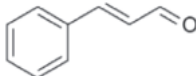
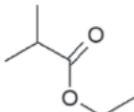
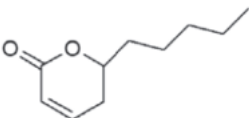
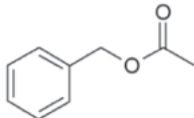
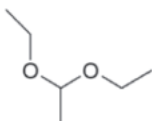
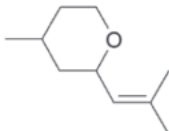
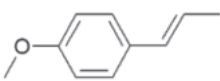
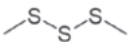
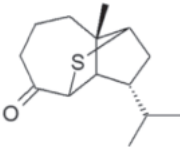
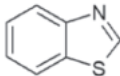
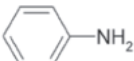
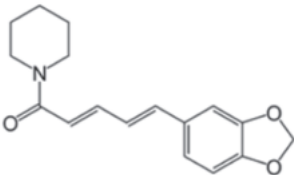
Fonction	Linéaire	Cyclique	Aromatique
Hydrocarbure	 myrcène céleri <i>musqué, herbacé</i>	 limonène citrus <i>agrumes</i>	 p-cymène origan, thym <i>origan, thym</i>
Alcool	 (Z)-hex-3-en-3-ol moutarde, ylang-ylang <i>herbe coupée</i>	 menthol menthe <i>menthe</i>	 thymol thym, origan <i>thym, origan</i>
Carbonyle	 heptan-2-one gingembre <i>fruitée, épicée</i>	 carvone graine de carvi, menthe <i>graine de carvi, menthe</i>	 cinnamaldéhyde cannelle <i>cannelle</i>
Ester/lactone	 isobutyrate d'éthyle myrte <i>sucrée, fruitée</i>	 massoïa lactone bois de massoïa <i>noix de coco, crémeux</i>	 acétate de benzyle ylang-ylang <i>jasmin</i>
Éther	 1,1-diéthoxyéthane rose <i>noisette, herbe</i>	 oxyde de rose rose <i>rose</i>	 anéthol badiane <i>anis</i>
Soufré	 trisulfure de diméthyle ail, oignon, moutarde <i>ail, oignon</i>	 mint sulfide rose, menthe, sauge <i>menthe, sauge</i>	 benzothiazole gingembre, rose chinoise <i>caoutchouteux, soufré</i>
Azoté	 aniline fenugrec <i>poisson pourri</i>	 pipérine poivre noir <i>poivré, animal</i>	 2,4-diméthylpyrazine iris <i>chocolat, noisette</i>

Tableau 2.2. Principales familles de constituants des huiles essentielles et exemples de composition.

Les noms des molécules apparaissent en vert, on retrouve en dessous la plante d'origine de l'huile essentielle dans laquelle la molécule a été identifiée. Enfin, la description olfactive de la molécule apparaît en italique.

L'identification de molécules portant l'odeur caractéristique d'une huile essentielle est également difficile et requiert la mise en œuvre de procédé complexe de séparation et d'identification tant structurale qu'olfactive. Ainsi, les analyses par chromatographie gazeuse couplée à l'olfactométrie ont mis en évidence que les molécules formant les huiles essentielles n'avaient pas forcément l'odeur de l'huile essentielle prise dans son ensemble (tableau 2.2).

Les constituants des huiles essentielles possèdent un squelette hydrocarboné qui peut être linéaire, cyclique ou encore aromatique. Ils peuvent posséder toutes les grandes fonctions de la chimie organique [2] : alcools, composés carbonylés (principalement aldéhydes et cétones), esters, phénols, et dans une moindre mesure dérivés azotés et soufrés (tableau 2.2). Néanmoins, les terpènes (hydrocarbures en C_{10} ou C_{15}) et terpénoïdes (terpènes fonctionnalisés) sont de loin les plus abondants.

3 Les mécanismes de l'olfaction

Les mécanismes biologiques dictant la reconnaissance des odeurs n'ont été que très récemment étudiés. Les grands progrès dans la compréhension de l'olfaction ont débuté en 1985 par la découverte des récepteurs olfactifs (RO) chez les vertébrés [3] et ont continué en 1989 par la mise en évidence de l'intervention de protéines G dans le mécanisme de l'olfaction [4]. En 1991, Buck et Axel ont identifié les gènes codant pour les RO et ont par la suite été récompensés en 2004 par un prix Nobel de médecine [5]. Le nombre total de gènes de RO a été estimé à environ 1 000 chez l'homme (dont 400 sont restés fonctionnels) et peut atteindre près de 5 000 chez l'éléphant, ce qui fait des RO la plus grande famille génétique ! La multitude d'interactions entre les divers protagonistes de la perception d'une odeur conduit à la production d'un signal de nature combinatoire [6], capable de discriminer un nombre virtuellement illimité d'odorants [7]. Dans la suite, nous passerons en revue la transformation d'un signal chimique en un signal électrique cheminant le long des neurones situés dans notre bulbe olfactif.

3.1. LE BULBE OLFACTIF, L'ORGANE DE LA PERCEPTION DES ODEURS

Situé à l'interface entre la cavité nasale et les régions corticales supérieures, le bulbe olfactif est une structure neuronale majeure du système

nerveux central, intégrée au cortex cérébral antérieur. Il est le siège de la première étape de traitement des informations olfactives.

Le bulbe olfactif se trouve à la croisée de deux voies qui permettent aux molécules odorantes de l'atteindre : la voie directe (ou ortho-nasale) est celle que l'on connaît le plus. Cette voie rejoint directement le bulbe olfactif à travers nos fosses nasales. Nous l'utilisons à chaque fois que nous respirons par le nez, comme lors de l'évaluation sensorielle d'un parfum par exemple (fig. 2.1).

La voie indirecte (ou rétro-nasale) permet quant à elle d'atteindre l'épithélium olfactif depuis le fond de notre palais. C'est elle qui rend possible la perception des molécules odorantes libérées lors de la mastication et de l'ingestion des aliments. Ce que nous appelons le goût est en réalité la combinaison de la perception de molécules sapides, qui sont finalement assez pauvres en termes de sensorialité et de molécules odorantes, qui confèrent une grande partie de la richesse aromatiques des aliments [8]. On ne distingue en effet que 5 grands types de molécules sapides, associées à des saveurs prototypiques : sucré, salé, amer, acide et umami. Le reste de la perception du goût est donc lié à la perception rétro-nasale de molécules odorantes contenues dans nos aliments (ainsi qu'à la perception de la texture de l'aliment, mais qui se rapproche plutôt du sens du toucher, *via* l'activation des nerfs trijumeaux).

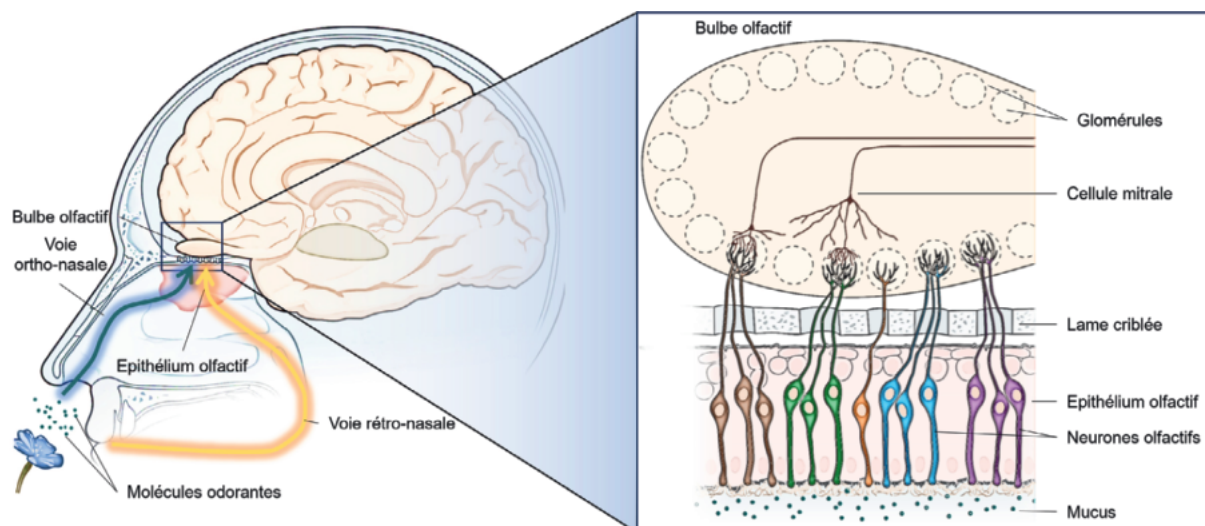


Figure 2.1. Coupe sagittale d'un crâne humain.

Les parfums que nous respirons par le nez empruntent la voie dite directe (ou ortho-nasale) afin d'atteindre le bulbe olfactif qui contient les neurones olfactifs. Lors de la mastication, les molécules odorantes libérées dans la bouche rejoignent ce même bulbe olfactif à travers la voie rétro-nasale.

Le bulbe olfactif pourrait être considéré comme le seul endroit où notre cerveau est en contact quasi immédiat avec l'environnement extérieur. En effet, les neurones olfactifs, dont l'extrémité baigne dans le mucus, traversent la paroi osseuse de notre crâne (la lame criblée) et atteignent le bulbe olfactif (fig. 2.1).

Dans la partie intracrânienne, on distingue les glomérules, qui sont des centres intégrateurs de l'information envoyée par les neurones olfactifs. Ces glomérules, dans lesquels convergent les neurones olfactifs, vont moduler la réponse de certains. Ils permettent ainsi de réguler la formidable masse d'informations qui sera ensuite envoyée, *via* d'autres cellules (les cellules mitrales), dans le reste du cortex cérébral [9]. Les extrémités des neurones olfactifs forment des cils qui baignent dans le mucus olfactif, un fluide physiologique qui évite le dessèchement de la muqueuse olfactive, elle-même constituée de différents types de cellules (fig. 2.1). C'est dans ce mucus qu'ont lieu l'ensemble des phénomènes moléculaires qui vont initier la transformation d'un signal chimique (porté par la molécule odorante) en un signal

neuronal qui sera transformé en une perception sensorielle au sein de notre cerveau.

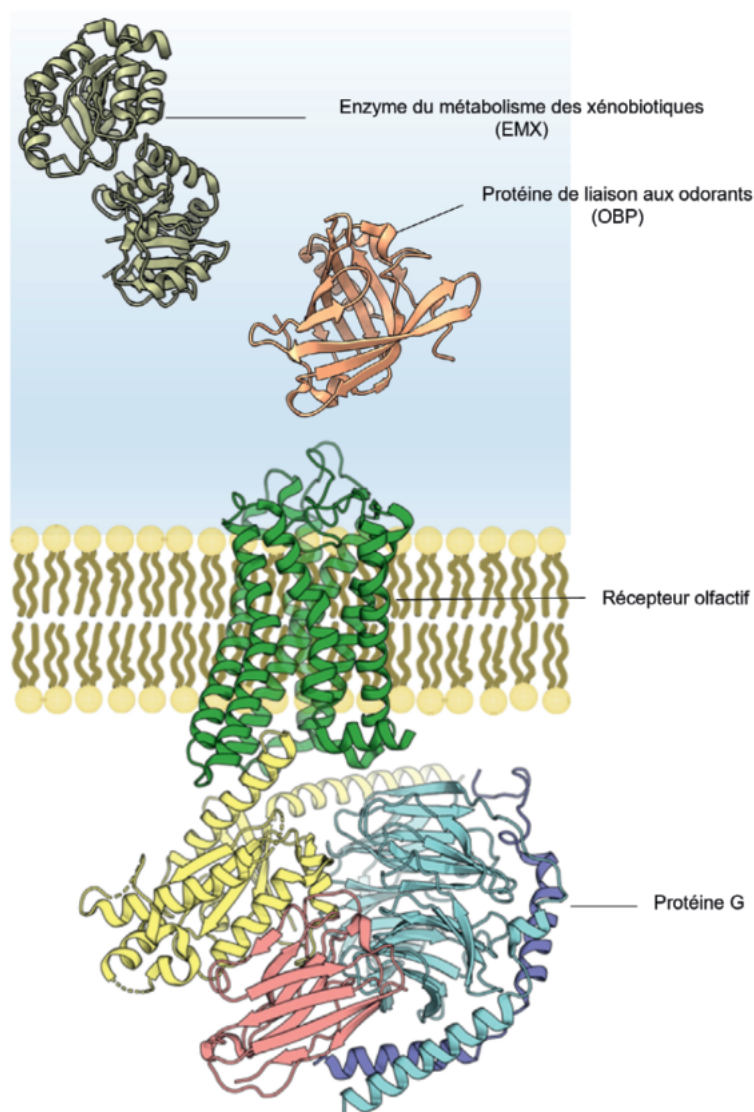
Ce signal est transmis au bulbe olfactif puis se propage ensuite à d'autres aires cérébrales, telles que le cortex olfactif primaire qui permet de reconnaître l'odeur et d'en apprécier la valence, l'hippocampe dont le rôle consiste à mémoriser l'odorant, ou l'hypothalamus qui réalise une liaison entre l'odeur perçue et le vécu, permettant éventuellement de déclencher une émotion [10].

3.2. LA PERCEPTION DES ODEURS D'UN POINT DE VUE MOLÉCULAIRE

Lors de l'inhalation, les molécules odorantes présentes dans l'air entrent en contact avec le mucus qui couvre l'épithélium olfactif comme schématisé dans la figure 2.2 (en page suivante). Le mucus contient différents types de protéines, dont des protéines de liaison aux odorants, ainsi que des protéines de dégradation. Ces deux types de protéines sont à l'origine de ce que l'on nomme les phénomènes péri-récepteurs, c'est-à-dire qui interviennent avant la reconnaissance des odorants par les RO [11].

Figure 2.2. Les différentes familles de protéines exprimées au niveau de l'épithélium olfactif et impliquées dans la reconnaissance des odorants.

Les molécules odorantes présentes dans l'air inhalé sont solubilisées dans le mucus qui contient différents types de protéines solubles : les protéines de liaison aux odorants (OBP) ou des enzymes du métabolisme des xénobiotiques (EMX). La reconnaissance des odorants se fait au niveau de la membrane du neurone dans laquelle sont enchâssés les récepteurs olfactifs (RO). Les RO appartiennent à une famille de protéines connues pour être impliquées dans une multitude de processus de signalisation cellulaire. Cette famille, les récepteurs couplés à une protéine G (RCPG), englobe entre autres les protéines qui nous permettent de percevoir le goût (certains récepteurs gustatifs) et celles qui nous permettent de percevoir la lumière (les opsines). Il s'agit de protéines transmembranaires, constituées de 7 domaines enchâssés dans la membrane d'une cellule. Au niveau intracellulaire, le signal est transmis par la protéine G.



3.3. LES PHÉNOMÈNES PÉRI-RÉCEPTEURS

3.3.1. LES PROTÉINES DE LIAISON DES ODORANTS : OBP

Les protéines de liaison aux odorants (*Odorant-Binding Proteins* ou OBP) sont des protéines solubles de la famille des lipocalines sécrétées en abondance dans le mucus nasal d'une grande variété d'espèces animales, y compris chez l'être humain [12]. Les OBP sont sécrétées par l'épithélium olfactif dans le mucus nasal à forte concentration (~10 mM). Différents sous-types d'OBP ont été mis en évidence chez une même espèce animale. Par exemple, deux OBP ont été

décrites chez le porc, quatre chez la souris ou trois chez le lapin. L'expression d'une seule OBP est également observée chez l'homme. Elle est limitée à la plus haute région de la fosse nasale, où les molécules odorantes sont détectées par les neurones porteurs des récepteurs olfactifs.

La résolution des structures d'OBP a révélé que cette famille de protéines partage un repliement très conservé caractérisé par une vaste cavité hydrophobe centrale (fig.2.3A). Elles présentent un tonneau β constitué de huit feuillets β antiparallèles reliés par sept boucles et coiffé par une hélice α (fig.2.3A). Ce tonneau β délimite une cavité hydrophobe, appelée calice, qui permet la

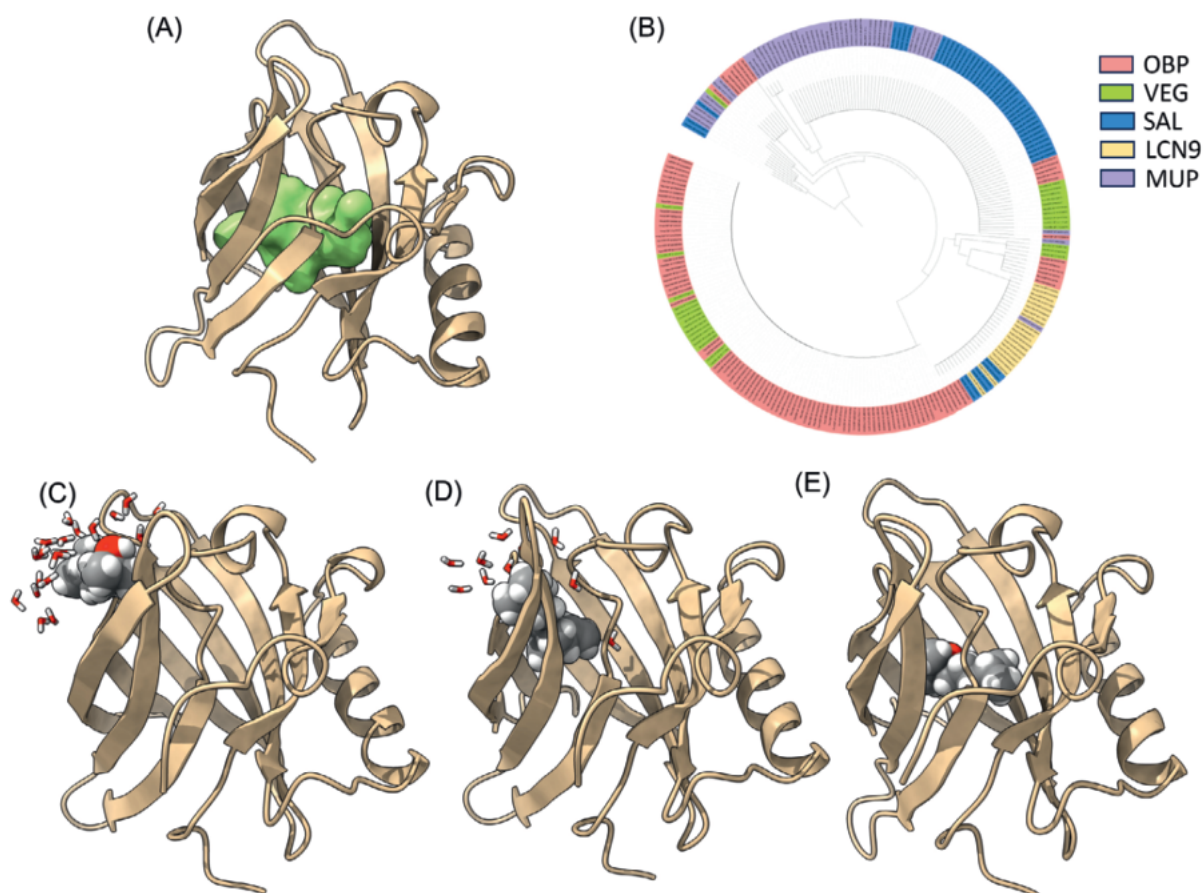


Figure 2.3. (A) Illustration de la cavité de liaison des OBP en vert au centre de la structure. (B) Arbre phylogénétique des lipocalines (OBP : Odorant Binding Protein ; VEG : von Ebner's glands ; SAL : Salivary Lipocalin ; LCN9 : lipocalin genes 9 ; MUP : Major Urinary Proteins). (C, D, E) Illustration du chemin de liaison d'un odorant dans une OBP. Durant la simulation, l'odorant rejoint le cœur de la protéine selon un chemin conservé. Ce processus s'accompagne d'une désolvatation (perte des interactions avec les molécules d'eau) du ligand.

liaison de molécules lipophiles, ce qui leur a valu le nom de lipo-calines. Cette architecture est particulièrement adaptée au transport des molécules odorantes à travers le mucus vers les neurones olfactifs. Par ailleurs, cette structure se caractérise par une stabilité remarquable face à la température, aux solvants organiques et à la digestion protéolytique, ce qui en fait des candidats intéressants pour le développement de biocapteurs robustes [13]. Les OBP ont la propriété de pouvoir lier des odorants variés en termes de taille et de fonctionnalités [14]. Le processus de liaison se fait selon un chemin de translocation conservé (fig.2.3 CDE), durant lequel on observe une désolvatation du ligand [15].

Le rôle essentiel des OBP dans le déclenchement de comportements et du codage de l'odeur a été démontré chez les insectes, mais il reste encore à démontrer chez les vertébrés et les humains en particulier. Ces protéines font l'objet de nombreuses recherches dans cette optique.

3.3.2. LES ENZYMES DU MÉTABOLISME DES XÉNOBIOTIQUES : EMX

Un xénobiotique est une molécule d'origine exogène. Ces xénobiotiques, de manière générale, sont métabolisés par un réseau d'enzymes qui favorisent leur élimination par diverses voies d'excrétion. Lorsque ce métabolisme a lieu dans le

foie (l'organe métabolique majeur), la voie d'excrétion est l'urine ou la bile.

Les odorants que nous respirons sont donc des xénobiotiques. Dans le mucus nasal, différentes enzymes joueraient un rôle de métabolisation de ces odorants, afin d'éviter la saturation des récepteurs olfactifs. Elles nous permettent de percevoir un gradient de molécules par flairages successifs. Sans elles, le mucus nasal se retrouverait très rapidement saturé en molécules odorantes, nous empêchant ainsi de percevoir de nouvelles odeurs dans des échelles de temps très rapides. Différentes observations confortent l'hypothèse selon laquelle la biotransformation des molécules odorantes aurait un impact notable sur la sensibilité du système olfactif. La perception olfactive résulterait de la détection à la fois des molécules odorantes mais aussi des métabolites formés au niveau du mucus et/ou de la muqueuse olfactive [16].

Les enzymes du métabolisme des xénobiotiques (EMX) occupent une place essentielle dans la biotransformation et l'élimination des composés exogènes. Fonctionnant au sein d'un réseau intégré de réactions enzymatiques, elles catalysent divers processus visant à rendre ces molécules plus hydrophiles et ainsi plus facilement éliminables par l'organisme.

Ces enzymes ont de manière générale pour fonction de rendre les odorants hydrophiles, en leur greffant des groupements polaires, les rendant ainsi inodores. On rencontre ainsi dans le mucus nasal humain une alcool-déshydrogénase ainsi qu'une aldéhyde-déshydrogénase et au moins deux uridines diphosphate-glucuronosyltransférases (UGT) [17].

Par exemple, la glucurono-conjugaison de molécules odorantes, catalysée par les UGT, rend les molécules odorantes inactives d'un point de vue olfactif. Cette réaction interviendrait ainsi dans l'arrêt du signal olfactif [18].

Au-delà des phénomènes péri-récepteurs, les odorants vont jouer leur rôle fondamental : déclencher la cascade de détection du signal olfac-

tif. Dans le fond du mucus nasal, se trouvent les cils des neurones olfactifs. Dans la membrane de ces cils, sont enchâssés les RO, ces protéines qui sont à l'origine de la cascade d'événements qui déclencheront la perception olfactive.

3.4. LA DÉTECTION DU SIGNAL : LES RÉCEPTEURS OLFACTIFS

Contrairement à ce que suggère leur nom, les récepteurs olfactifs (RO) ne sont pas exclusivement exprimés dans les neurones sensoriels olfactifs, où ils sont localisés à la surface des cils et impliqués dans la détection des odeurs. En effet, leur expression dite ectopique (c'est-à-dire observée dans des tissus ou des types cellulaires différents de ceux où ils sont classiquement attendus) a été largement démontrée. De nombreuses études ont mis en évidence la présence de RO dans divers tissus non olfactifs, tels que les testicules, le foie, les poumons, les intestins, la peau, le cœur ou encore le sang. Dans ces tissus, certains RO présentent une expression restreinte à un type cellulaire spécifique, tandis que d'autres sont largement répartis dans l'ensemble de l'organisme [19].

Dans ces tissus, les RO rempliraient diverses fonctions cellulaires de signalisation et d'orientation, comme la chimiotaxie observée dans les cellules spermatiques. Ainsi, une étude a montré qu'il existerait un lien entre anosmie spécifique et infertilité [20] ! Ce rôle de guidage est également envisagé au niveau de l'épithélium olfactif, dont les neurones se régénèrent continuellement grâce à des cellules souches basales [21]. Les nouveaux neurones olfactifs semblent retrouver leur glomérule cible dans le cortex grâce à l'action de leurs propres RO, qui interviendraient ainsi avant même la perception sensorielle, en orientant la croissance neuronale. Ainsi, loin d'être confinés au nez, les RO apparaissent comme des capteurs polyvalents jouant un rôle clé dans divers processus physiologiques et pathologiques, et pourraient constituer à l'avenir des cibles diagnostiques et thérapeutiques prometteuses.

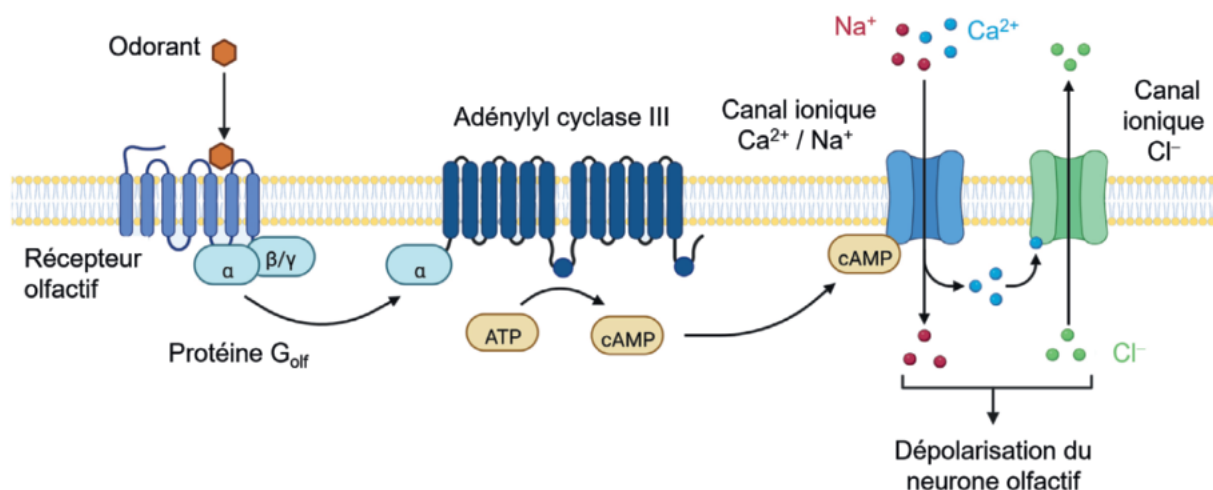


Figure 2.4. Illustration du mécanisme de transduction de l'information chimique en signal électrique.

La formation du complexe odorant-récepteur induit une cascade de réaction biologique dont la première étape est l'activation de la protéine G_{olf} . Le message est ensuite transmis à l'adénylyl cyclase qui convertit l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine 3,5-monophosphate cyclique (cAMP). L'augmentation de la concentration en cAMP entraîne à son tour l'ouverture d'un canal ionique qui se traduit par l'entrée de cations Ca^{2+} et Na^{+} . Cette augmentation de concentration à son tour induit l'ouverture de canaux ioniques spécifiques aux anions Cl^{-} . Cette accumulation d'ions de part et d'autre de la membrane crée une dépolarisation du neurone olfactif qui se propage en potentiel d'action jusqu'au bulbe olfactif.

3.4.1. D'UN SIGNAL CHIMIQUE VERS UN SIGNAL ÉLECTRIQUE

Le système olfactif suit une stratégie de reconnaissance extrêmement sophistiquée reposant sur un répertoire d'environ 400 RO présents à la surface de l'épithélium olfactif [5]. Ces récepteurs sont au commencement d'une cascade de processus biologiques menant à la transformation d'un signal chimique en potentiels électriques interprétables par notre cerveau (fig. 2.4). L'activation du RO va déclencher une voie de signalisation faisant intervenir des protéines intracellulaires. Cette voie est à l'origine de la modification du gradient de concentration d'ions entre le cytoplasme (l'intérieur de la cellule) et le périplasma (l'extérieur de la cellule, ici le mucus olfactif). Ce changement de concentration va induire une dépolarisation de la membrane du neurone. Ce signal électrique va se propager le long de l'axone du neurone, jusqu'à atteindre le glomérule.

Les neurones olfactifs ont la particularité de n'exprimer majoritairement qu'un seul type de RO [22]. Par conséquent, l'activation d'un type

de récepteur par un odorant va alors entraîner l'activation des neurones qui expriment ce récepteur. Observer l'activation d'un neurone est alors équivalent à observer l'activation d'un RO au niveau moléculaire.

3.4.2. LE CODE COMBINATOIRE DE L'OLFACTION

À l'échelle moléculaire, la reconnaissance des odorants est basée sur la reconnaissance de formes plutôt que sur l'identification isolée d'une molécule spécifique, la grande majorité des récepteurs olfactifs répondent à différentes molécules [23]. Lors de l'inhalation, un odorant interagit avec un sous-ensemble de récepteurs olfactifs (fig. 2.5 en page suivante). L'activation différentielle de ce répertoire est ensuite interprétée par le système nerveux central comme une odeur. Dans ce schéma, une odeur est définie par un code combinatoire d'activation de récepteurs olfactifs : une molécule peut activer un sous-ensemble de récepteurs, et chaque récepteur peut répondre à plusieurs molécules différentes [6]. Ce concept est illustré dans la figure 2.5.

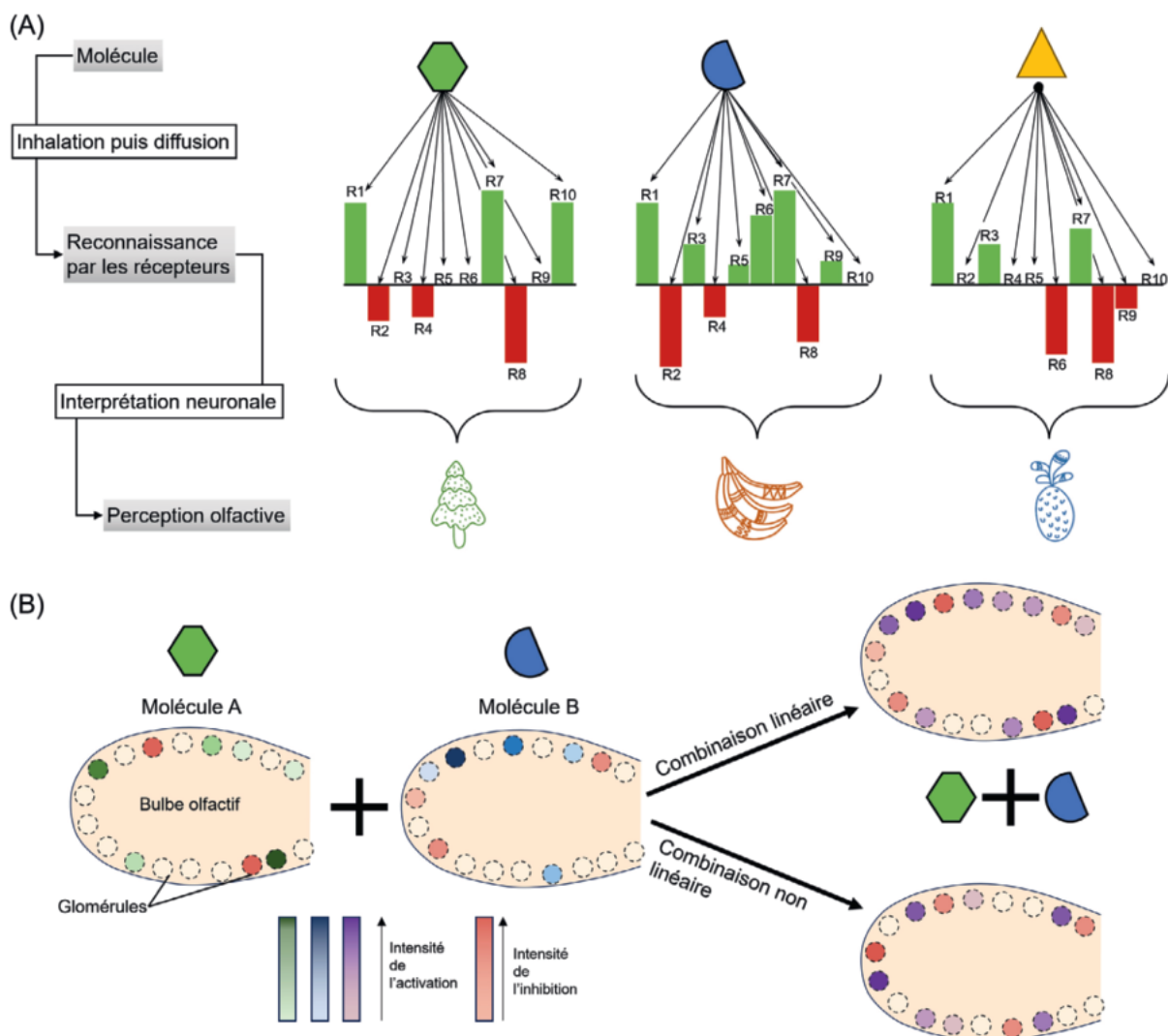


Figure 2.5. Illustration de l'interprétation de la molécule par les récepteurs olfactifs.

(A) L'interaction d'une molécule odorante avec l'ensemble des récepteurs olfactifs portés par des neurones indépendants induit une activation et inhibition qui dépendra de l'affinité de cet odorant avec les RO. Chaque odorant va générer une combinaison caractéristique, en fait associée aux glomérules qui sont activés via les neurones olfactifs. Cette réponse, a priori unique pour chaque odorant, sera interprétée comme une odeur par le sujet. La réponse des récepteurs olfactifs pour chaque molécule est représentée sous forme d'histogrammes dont la hauteur des barres correspond à l'intensité de la réponse. Les barres vertes et rouges représentent respectivement l'activation et l'inhibition. (B) Les images olfactives. Au niveau du bulbe olfactif, les glomérules seront activés ou inhibés différemment selon les molécules inhalées. Le mélange des deux odorants A+B peut éventuellement être la somme des deux premiers signaux, bien que cela ne soit pas systématique.

Comprendre le mécanisme par lequel un nombre relativement faible de récepteurs, typiquement quelques centaines [24], permet la discrimination d'une multitude de molécules odorantes reste un défi majeur. De nouvelles recherches indiquent que même des altérations mineures de la fonctionnalité d'un seul récepteur peuvent avoir des conséquences perceptives notables [25]. Bien

que nous sachions que la famille des gènes de RO présente une diversité génétique et fonctionnelle importante, la nature complexe du code olfactif et nos connaissances limitées sur les paires RO-odorant spécifiques posent des problèmes pour traduire cette variabilité en distinctions perceptives [23].

4 Vers la numérisation de l'olfaction

La perception sensorielle induite par les odorants est la résultante d'un processus d'une formidable complexité. Durant de nombreuses années, il a été admis qu'il était extrêmement difficile d'obtenir une méthode universelle de prédiction de l'odeur d'une molécule (et à plus forte raison d'un mélange) sur la base des structures moléculaires ou d'une ou plusieurs propriétés chimiques intrinsèques des odorants [26]. Avant même d'évoquer l'aspect purement chimique de ces phénomènes, il convient de souligner un aspect important du défi de la prédiction des odeurs. La réponse physiologique liée à la perception d'une molécule odorante n'est pas une propriété physique ou une activité biologique mesurable, mais une perception qui ne peut être que décrite qualitativement par un sujet. Ces approches sont donc asservies à la richesse de notre vocabulaire, à notre vécu ainsi qu'à notre entraînement à reconnaître les odeurs.

4.1. DÉORPHANISATION NUMÉRIQUE DES RÉCEPTEURS OLFACTIFS

Les progrès de la biologie moléculaire ont ouvert la voie à l'identification des odorants qui ont le plus d'affinité pour un récepteur dont on ne connaît pas les agonistes (un agoniste est une molécule qui induit l'activation du récepteur). On parle dans ce cas de récepteurs orphelins. Ces approches, dites de déorphanisation, restent néanmoins coûteuses.

Les données rassemblant les résultats des tests d'associations de plus de 75 000 paires odorants-récepteurs ont été regroupées et sont désormais en libre accès à travers la base de données M2OR [27]. Néanmoins, le code combinatoire complet n'est connu que pour une poignée d'odorants et ne permet pas encore de déchiffrer les règles de reconnaissance des odorants pour les RO [23].

En s'appuyant sur les données de M2OR ainsi que sur les avancées en apprentissage profond (ici, des réseaux de neurones en graphes), un modèle de prédiction des interactions odorants-récepteurs a permis de compléter l'ensemble du code combinatoire (400 récepteurs) pour 6 000 molécules connues [28].

4.2. PRÉDICTION DE L'ODEUR D'UNE MOLÉCULE

Le développement de l'intelligence artificielle couplé à l'ouverture de bases de données sur les odorants ont donné lieu à des avancées majeures dans la prédiction de l'odeur d'une molécule [29]. Cette équipe a abandonné les descripteurs chimiques classiques, jugés inadaptés aux discontinuités entre espace chimique et espace perceptuel, et développé un réseau neuronal à passage de messages (MPNN) représentant chaque odorant sous forme de graphe. Leur modèle atteint désormais des performances prédictives comparables à celles d'un panel d'individus non entraînés !

5 Conclusion

La compréhension du système olfactif repose aujourd'hui sur des bases neuro-anatomiques solides : l'architecture neuronale impliquée dans la perception des odeurs est bien décrite, depuis l'épithélium olfactif jusqu'au bulbe olfactif, véritable plateforme d'intégration des signaux sensoriels olfactifs. La nature intrinsèquement combinatoire de l'olfaction, où chaque odeur résulte d'un ensemble complexe d'interactions entre les molé-

cules odorantes, les récepteurs olfactifs et les protéines du mucus, confère à ce sens une dimension fascinante.

Les molécules odorantes constituent une classe extraordinairement diverse, dont seule une fraction infime a été identifiée à ce jour. Cette richesse, encore largement inexplorée, représente une formidable opportunité d'innovation pour le secteur des arômes et des parfums, où la découverte de

LA CHIMIE DES HUILES ESSENTIELLES

Utilisées depuis des siècles pour leurs propriétés odorantes, thérapeutiques ou rituelles, les huiles essentielles sont désormais au cœur de nombreux secteurs : arômes alimentaires, parfumerie, cosmétique, pharmacie, compléments alimentaires, biocontrôle et, plus largement, bioéconomie. Derrière leur image de produits naturels se cachent pourtant des mélanges moléculaires d'une grande complexité, dont la compréhension exige une solide maîtrise de la chimie.

L'objectif de cet ouvrage est de proposer une vision scientifique, rigoureuse et actualisée de la chimie des huiles essentielles, depuis leur histoire et leurs procédés d'obtention jusqu'à leur caractérisation chimique, leur analyse, leurs propriétés biologiques et leurs applications industrielles.

Il s'adresse aux professionnels des filières des arômes, parfums, cosmétiques, pharmacie, compléments alimentaires et biocontrôle, ainsi qu'aux étudiants souhaitant acquérir une compréhension approfondie des fondements chimiques des huiles essentielles.

À travers les différents chapitres, le lecteur découvrira comment la chimie permet d'expliquer la diversité des huiles essentielles, d'en maîtriser la production, d'en garantir la qualité et d'en comprendre les activités biologiques. Plus qu'un simple ouvrage de chimie, ce livre se veut un outil au service d'une utilisation raisonnée, durable et innovante des huiles essentielles, dans un contexte où les attentes sociétales, les avancées scientifiques et les enjeux environnementaux n'ont jamais été aussi étroitement liés.

Sous la direction de :

Xavier Fernandez est professeur à l'université Côte d'Azur (Institut de chimie de Nice UMR CNRS 7272). Il est auteur de 7 ouvrages, plus de 200 publications, 11 brevets et de nombreuses conférences et communications. Il est directeur de la Chaire partenariale patrimoine Arômes, Parfums, Cosmétiques en Pays de Grasse.

Anne-Sylvie Fabiano-Tixier est maître de conférences d'Avignon Université et directrice adjointe de l'UMR 408 SQPOV de l'INRAE. Elle est l'auteure d'un livre, de 17 chapitres d'ouvrages, de près de 110 publications, 14 brevets et de nombreuses conférences et communications. Elle est responsable de la chaire partenariale UNESCO-Chimie verte et durable du végétal.

SOMMAIRE

► Première partie : Généralités

1. La production des huiles essentielles en France - 2. La chimie des substances odorantes - 3. La sécrétion et le stockage des huiles essentielles par les végétaux - 4. Les voies de biosynthèse des huiles essentielles

► Deuxième partie : L'extraction des huiles essentielles de l'Antiquité à nos jours

5. L'extraction des huiles essentielles à travers l'histoire - 6. Les techniques de distillation des plantes - 7. L'éco-extraction des huiles essentielles : intensification et innovation

► Troisième partie : L'analyse des huiles essentielles

8. Les analyses physico-chimiques des huiles essentielles - 9. Les analyses chromatographiques - 10. Vers la découverte de nouveaux composés. Méthodes modernes d'analyse

► Quatrième partie : Propriétés et applications

11. Les applications des huiles essentielles dans le domaine des arômes et parfums - 12. Les activités chimiques et biologiques des huiles essentielles - 13. Les huiles essentielles comme ingrédients pour une chimie « verte » - 14. Se former à la chimie des huiles essentielles



CHIMIE VERTE
& DURABLE
DU VÉGÉTAL



Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des contenus de cette publication et des opinions qui y sont exprimées, lesquelles ne sont pas forcément conformes à celles de L'UNESCO et n'engagent pas l'organisation.

35,90 €

ISBN : 978-2-8073-7238-2



www.deboecksuperieur.com

De Boeck Supérieur s'engage
durablement
pour l'environnement

