



HAL
open science

La contribution de l'olfaction canine à la détection et la localisation de restes humains

Caroline Estelle Ksionkowski

► To cite this version:

Caroline Estelle Ksionkowski. La contribution de l'olfaction canine à la détection et la localisation de restes humains. Médecine vétérinaire et santé animale. 2024. dumas-04811174

HAL Id: dumas-04811174

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04811174v1>

Submitted on 29 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année 2024

LA CONTRIBUTION DE L'OLFACTION CANINE À LA DÉTECTION ET LA LOCALISATION DE RESTES HUMAINS

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 25 octobre 2024

par

Caroline Estelle KSIONKOWSKI

sous la direction de

Dominique GRANDJEAN

JURY

Président du jury :	M. Alain FONTBONNE	Professeur à l'EnvA
Directeur de thèse :	M. Stéphane BLOT	Professeur à l'EnvA
Examineur :	M. Gregory JOUVION	Professeur à l'EnvA
Membre invité co-encadrant :	M. Dominique GRANDJEAN	Professeur à l'EnvA

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire

version mai 2024



Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
Mme	Benchkroun	Ghita	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valérie	Professeur	DEPEC
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquibet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Mathias	Professeur	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guéneç	Christelle	Professeur	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Rivière	Julie	Professeur	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Béguin	Jérémy	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Radière	Guéric	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, M. Alain Fontbonne, Professeur à l'EnvA,

Je vous remercie d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse et de juger mon travail. Je vous remercie également pour la qualité de vos enseignements durant mes études.

A M. Stéphane Blot, Professeur à l'EnvA,

Merci à vous d'avoir accepté, au pied levé, d'intégrer le jury de cette thèse. J'en profite donc pour vous remercier pour vos enseignements et pour m'avoir ainsi permis d'apprécier sincèrement la neurologie.

A M. Gregory Jouvion, Professeur à l'EnvA,

Je vous remercie également d'avoir accepté ce rôle d'examineur pour cette thèse et de juger mon travail. Je vous remercie également pour m'avoir transmis votre passion de l'anatomie pathologique spéciale durant mes études.

A M. Dominique Grandjean, Professeur à l'EnvA,

Un grand merci à vous pour m'avoir accompagnée durant l'élaboration de cette thèse. Merci de m'avoir partagée vos nombreux contacts acquis grâce à votre très longue expérience dans le domaine cynotechnique. Grâce à votre introduction dans ce domaine, j'espère pouvoir continuer à évoluer dans ce monde passionnant.

A l'Adjudant-Chef Hamoniaux, Adjudant-Chef de l'équipe du CNICG,

Un immense merci pour m'avoir ouvert les portes de votre unité si spéciale. Merci pour votre accueil chaleureux, de l'équipe du CNICG, ainsi que celle du CNICG dans son intégralité. Vos explications détaillées, cette immersion dans votre milieu ainsi que vos connaissances m'ont énormément aidées pour l'élaboration de cette thèse.

A M. Thierry Lamour, Docteur vétérinaire et vétérinaire des armées,

Merci pour votre aide malgré votre emploi du temps très chargé ainsi que pour vos pistes de recherche m'ayant permis d'élaborer cette thèse.

A M. Gregory Herin, co-fondateur de Getxent,

Un très grand merci pour votre confiance ainsi que pour nous avoir permis d'essayer votre technologie. Merci également d'avoir pris le temps de m'expliquer son fonctionnement, ses avantages et son développement.

Table des matières

Liste des figures	5
Liste des tableaux	9
Liste des abréviations	11
Introduction	13
Première partie : L'odorat du chien	15
1. Rappels sur le système olfactif	15
A. <i>Anatomie du système olfactif</i>	15
a. Narines	15
b. Cavités nasales	16
c. Sinus paranasaux.....	18
d. Organe voméronasal	18
e. Centres de l'olfaction	19
B. <i>Histologie du système olfactif</i>	21
a. Muqueuse olfactive, système olfactif principal	21
b. Centres olfactifs primaire et secondaire.....	23
2. Physiologie de l'olfaction.....	24
A. <i>Flux d'air et transport de molécules odorantes jusqu'à l'appareil olfactif</i>	24
B. <i>Étapes de la perception des odeurs</i>	26
a. De la molécule odorante aux récepteurs olfactifs	26
b. Récepteurs olfactifs	27
c. Transduction du signal olfactif	29
d. Transmission du signal olfactif	29
e. Intégration centrale de l'information périphérique	30
C. <i>Caractéristiques de l'olfaction</i>	31
a. Seuil de détection,.....	31
b. Seuil de reconnaissance	32
c. Progression	32
d. Adaptation	32
e. Phénomène de fatigue	32
3. L'odorat du chien au service de l'homme	33
A. <i>L'odorat ou plus précisément le reniflement</i>	33
B. <i>Une grande diversité d'utilisations de l'odorat canin par l'Homme</i>	33
a. Détection de substances dangereuses	34
b. Détection de substances illégales	34
c. Détection d'odeurs biologiques	34
d. Détection d'organismes vivants.....	35
Deuxième partie : L'importance des chiens de recherche de restes humains	37
1. Le Groupe Nationale d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie (GNICG).....	38
A. <i>Présentation générale du Centre National d'Instruction Cynophile de la Gendarmerie de Gramat (CNICG)</i>	38
B. <i>Présentation générale du Groupe national d'investigation cynophiles de la Gendarmerie (GNICG)</i> 38	
2. Formation à la recherche de restes humains.....	39
A. <i>Formation des chiens</i>	39
a. Quelques éléments de la littérature.....	39
b. En pratique	41
B. <i>Rôles du maître-chien</i>	44
a. En binôme avec le chien	44
b. Dans un contexte et un environnement.....	45

c. Avec l'appui de nouvelles technologies.....	45
3. Alternatives et aides à la formation	47
A. Alternatives à l'utilisation de cadavres.....	49
B. Pseudo-odeurs :	52
C. Nouvelles technologies d'analyse et de transfert d'odeurs	53
4. Aspects juridiques	56
A. La validité d'une réponse positive par un chien.....	56
B. Détection et reconnaissance juridique des COV associés à la décomposition humaine	57
C. Utilisation de tissus humains	57
Troisième partie : Facteurs individuels canins de variation de l'acuité olfactive.....	61
1. L'acuité olfactive canine chez les mammifères	61
2. Choix de la race	61
A. L'acuité olfactive des différentes races.....	61
B. Critères de choix de la race.....	62
C. Races utilisées au GNICG et en RRH.....	62
3. Choix de l'individu	63
A. Critères de choix de l'individu.....	63
B. Méthodes de sélection.....	65
4. Facteurs physiologiques de variation de l'acuité olfactive	66
A. Le sexe	66
B. L'âge.....	66
C. La nutrition et hydratation	67
D. L'état physique	68
Quatrième partie : Facteurs environnementaux de variation de l'acuité olfactive	71
1. Température et humidité	71
2. Précipitations	71
3. Pression atmosphérique et champs électromagnétiques	71
Cinquième partie : Facteurs humains de variation de l'acuité olfactive.....	73
1. Étapes de la décomposition humaine	73
A. Décomposition cellulaire.....	73
B. Décomposition systémique.....	74
a. Stade putride, phase précoce	74
b. Stade de gonflement, phase intermédiaire.....	76
c. Stade de destruction/décomposition, phase tardive.....	76
2. Influence des facteurs environnementaux sur le corps.....	77
A. Facteurs environnementaux primaires	77
a. Température :	77
b. Microbiologie :	78
c. Entomologie :	78
B. Facteurs environnementaux secondaires.....	79
a. Type de sol.....	79
b. Enterrement.....	80
c. Conditions extrêmes.....	80
3. Le profil olfactif des cadavres humains	82
A. Identification des composés organiques volatils (COV)	82
a. Gaz	85
b. Biomolécules principales	85
c. Tissus spécifiques	85
d. Lipides et tissus adipeux	86
B. Variations individuelles de COV	86
C. Exemples de facteurs environnementaux influençant les COV.....	89
D. Exemples de facteurs individuels influençant les COV	90

4. Localisation du corps	91
A. Source odorante	91
B. Diffusion des effluves humaines	93
C. Particularités environnementales	94
a. Topographie et vent :	94
b. Microclimats et barrières :	95
c. Influence du sol :	96
d. Plantes et environnement naturel :	96
e. Importance de l'eau et des précipitations	97
f. Conditions intérieures	98
Conclusion.....	101
Liste des références bibliographiques.....	103
Annexe 1	113
Annexe 2	121
Annexe 3	122

Liste des figures

Figure 1 : Nez externe et cartilages nasaux (d'après Evans et de Lahunta, 2013)	16
Figure 2 : Section paramédiane de la tête du chien ; la cloison nasale a été retirée (d'après Singh, 2017)	17
Figure 3 : Section transverse des cavités nasales entre la canine et la première prémolaire (d'après Evans et de Lahunta, 2013)	17
Figure 4 : Sinus paranasaux chez le chien (d'après Singh, 2017).....	18
Figure 5 : Vue schématique du canal incisif et de l'organe voméronasal (d'après Evans et de Lahunta, 2013)	19
Figure 6 : Coupe sagittale du nez montrant la répartition des nerfs de l'olfaction (d'après Evans et de Lahunta, 2013)	20
Figure 7 : Vue ventrale simplifiée du cerveau et des voies de l'olfaction (d'après Evans et de Lahunta, 2013)	20
Figure 8 : Les voies nasales canines (d'après Craven <i>et al.</i> , 2010)	21
Figure 9 : Coupe transversale de l'épithélium olfactif (d'après Vadurel et Gogny, 1997)	22
Figure 10 : Structure du bulbe olfactif (d'après Barone, 2004)	24
Figure 11 : Dynamique intranasale des fluides de l'olfaction canine (d'après Craven <i>et al.</i> , 2010)	25
Figure 12 : Schéma simplifié global des étapes de la perception d'une odeur (d'après Kokocińska-Kusiak <i>et al.</i> , 2021).....	26
Figure 13 : Transport des substances odorantes vers le site de liaison des récepteurs olfactifs (OR) avec l'aide des OBP (d'après Zarzo, 2007).....	27
Figure 14 : Interaction entre les molécules odorantes, à gauche, et les récepteurs olfactifs, à droite selon différents schémas combinatoires (d'après Ache et Young, 2005)	28
Figure 15 : Cascades de signalisation simplifiées intracellulaire impliquées dans la transduction chimiosensorielle (d'après Ache et Young, 2005).....	29
Figure 16 : Schématisation du système olfactif jusqu'à la transmission du signal olfactif (d'après Salveco, 2024)	30
Figure 17 : Schéma de la voie centrale d'intégration d'information olfactive (d'après Jenkins <i>et al.</i> , 2018)	31
Figure 18 : Schéma du conditionnement Pavlovien (d'après Psychanalyse, 2024)	41
Figure 19 : Types de conditionnement utilisés par les maîtres interrogés pour entraîner leurs chiens détecteurs de restes humains (d'après Clément, 2022).....	43

Figure 20: Type de jouet utilisé au GNICG avec les chiens afin de les récompenser. Dans ce cas, le chien se récompense lui-même en trouvant le jouet caché (photographie personnelle)	43
Figure 21 : Types d'outils de formation utilisés par les brigades de chiens de détection de restes humains étudiées pour entraîner leurs chiens (d'après Clément, 2022).....	48
Figure 22 : Représentation visuelle montrant les différences chimiques et de fabrication entre le matériau d'origine, les pseudo-odeurs et les alternatives (d'après Simon <i>et al.</i> , 2020).....	49
Figure 23 : Classes de COV pour neuf aides à la formation (obtenues à partir de membres/pieds amputés) analysées au cours de cinq mois différents entre décembre 2019 et mai 2021 (d'après Dargan <i>et al.</i> , 2022).....	51
Figure 24 : Relations entre facteurs relatifs à l'efficacité de la recherche avec des chiens (d'après Hayes <i>et al.</i> , 2018)	58
Figure 25 : Facteurs influençant l'efficacité de la détection olfactive canine (d'après Kokocińska-Kusiak <i>et al.</i> , 2021).....	59
Figure 26 : Races actuellement utilisées comme chiens de détection de restes humains sur les cadavres, selon une enquête réalisée par dix brigades d'Europe et du Canada (d'après Clément, 2022)	63
Figure 27 : Estimation par les maîtres-chiens de l'importance des traits physiques et comportementaux qui doivent être pris en compte lors de la sélection des chiens détecteurs de restes humains (d'après Clément, 2022)	64
Figure 28 : Évolution du nombre de composés organiques volatils détectés dans une carcasse de porc en fonction du stade de décomposition et du temps post-mortem (d'après Verheggen <i>et al.</i> , 2017)	84
Figure 29 : Caractéristiques des COV sécrétés durant les différentes phases de décomposition d'un corps humain (d'après Cieśla <i>et al.</i> , 2023).....	84
Figure 30: COV collectés auprès d'humains vivants et de restes humains (d'après DeGreeff, 2010)	87
Figure 31 : Profils olfactifs recueillis à partir de restes humains en phase de décomposition 1 et 2 (d'après DeGreeff, 2010).....	88
Figure 32 : Profils olfactifs collectés à partir de restes d'animaux et d'humains (d'après DeGreeff, 2010)	89
Figure 33 : Classes de COV, en été et en hiver, échantillonnés à partir de restes humains (H) et porcins (P) (d'après Knobel <i>et al.</i> , 2019).....	90
Figure 34 : Réserve olfactive primaire (d'après Rebmann et David, 2000).....	92
Figure 35 : Cône d'odeur horizontal dû au vent (d'après Rebmann et David, 2000)	92
Figure 36 : Cône odorant vertical dû à l'élévation thermique (d'après Rebmann et David, 2000) ..	92

Figure 37 : Dissémination des odeurs depuis une source odorante fixe (d'après Demuliere, 2008)	93
Figure 38 : Bassins/cônes olfactifs primaires et secondaires dus aux barrières/végétations du terrain (d'après Rebmann et David, 2000)	93
Figure 39 : Courant ascendant créant un vide olfactif (1) et cône olfactif éloigné (2) au-dessus du corps (d'après Rebmann et David, 2000).....	95
Figure 40 : Courant descendant créant des bassins olfactifs éloignés sous le corps (d'après Rebmann et David, 2000)	95
Figure 41 : Interprétation des alertes complexes (d'après Rebmann et David, 2000)	96
Figure 42 : Bassins/cônes d'odeurs primaires et secondaires (d'après Rebmann et David, 2000)	97
Figure 43 : L'odeur se répand en aval par ruissellement de surface en direction d'un ruisseau ou du bassin olfactif secondaire (d'après Rebmann et David, 2000).....	97
Figure 44 : Création d'un bassin olfactif à distance du corps par le courant d'eau (d'après Rebmann et David, 2000).....	98
Figure 45 : Exemple d'un type de recherche en quadrillage le long de couloirs étroits (d'après Rebmann et David, 2000)	99

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ensemble des matières utilisées pour l'imprégnation de tubes Getxent à partir de cadavres d'êtres humains, imprégnés durant 7 jours (d'après Getxent, 2024)..... 55

Liste des abréviations

OBP : Odorant-Binding-Proteins

COV : Composés Organiques Volatils

GNICG : Groupe Nationale d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie

RRH : Recherche de Restes Humains

CNICG : Centre National d'Instruction Cynophile de la Gendarmerie

UDC : Universal Detector Calibrant

ATP : Adénosine triphosphate

Introduction

L'olfaction canine a toujours fasciné par son efficacité et sa précision. Depuis des siècles, l'homme exploite cet atout sensoriel exceptionnel pour diverses tâches, qu'il s'agisse de la chasse, de la recherche de personnes disparues ou encore de la détection de substances illicites. Plus récemment, cette capacité a été exploitée pour une application particulièrement sensible : la détection et la localisation de restes humains. En effet, l'odorat du chien se révèle être un outil précieux pour les forces de l'ordre et les équipes de secours lors de recherches en terrain difficile, ou dans des cas de disparitions non élucidées. Cependant, malgré son efficacité reconnue, la compréhension scientifique des mécanismes olfactifs à l'œuvre reste un champ de recherche en plein développement.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la contribution de l'olfaction canine dans le domaine spécifique de la détection de restes humains. Cette capacité repose sur des mécanismes biologiques et physiologiques complexes qui permettent au chien de percevoir et de discriminer des odeurs que l'être humain ne peut détecter. À travers une analyse approfondie des caractéristiques anatomiques et fonctionnelles du système olfactif canin, nous explorerons les bases scientifiques qui expliquent ces performances exceptionnelles.

L'objectif de ce travail est de fournir une vision complète et nuancée de l'utilisation des chiens pour la recherche de restes humains. Nous examinerons les différentes approches mises en œuvre pour former ces animaux, les défis rencontrés sur le terrain, ainsi que les progrès réalisés grâce à l'évolution des technologies de détection. La présente étude abordera également les facteurs individuels, environnementaux et humains influençant l'efficacité de l'olfaction canine.

Ce travail s'articule autour de plusieurs axes. Dans une première partie, nous présenterons les aspects fondamentaux du système olfactif canin, en passant en revue l'anatomie, l'histologie et la physiologie de l'olfaction. La deuxième partie portera sur l'importance des chiens dans les recherches cynotechniques, notamment au sein des forces de l'ordre, et sur les méthodes de formation employées pour la détection de cadavres. Ensuite, nous aborderons les facteurs individuels qui influencent l'acuité olfactive des chiens, avant de nous intéresser aux conditions environnementales et humaines pouvant affecter leurs performances. Enfin, nous conclurons en évoquant les avancées récentes dans ce domaine et les perspectives d'avenir.

Première partie : L'odorat du chien

1. Rappels sur le système olfactif

Dans cette première partie, nous examinerons les principaux éléments qui composent le système olfactif du chien, afin de mieux comprendre la physiologie de son odorat et son utilité dans la recherche de restes humains.

Les composantes clés de ce système, à savoir la cavité nasale, l'épithélium et les récepteurs olfactifs, l'organe voméronasal et le bulbe olfactif, seront détaillées dans cette section.

A. Anatomie du système olfactif

L'appareil olfactif, au sens large, inclut les narines qui assurent une communication avec l'extérieur via des orifices, ainsi que les cavités nasales qui permettent le passage de l'air. Cet appareil est donc essentiel à la respiration et à l'olfaction. Le nez se divise en deux cavités symétriques, appelées vestibules nasaux, qui relient les narines aux cavités nasales. (Singh, 2017)

Ensemble, la partie faciale du système respiratoire et la partie rostrale du système digestif forment ce que l'on appelle le museau (Figure 1). (Evans et de Lahunta, 2013)

a. Narines

Les narines constituent la voie d'entrée de l'air et des particules odorantes. La peau humide qui les entoure, appelée plaque nasale, est divisée par un philtrum médian qui se prolonge ventralement jusqu'à la rainure de la lèvre supérieure. La plaque nasale est recouverte d'un épais épiderme kératinisé et est maintenue humide grâce aux sécrétions des glandes de la cavité nasale. Les narines sont maintenues ouvertes grâce à un ensemble de cartilages. Un cartilage alaire incurvé et mobile soutient le toit ainsi que l'aile du nez. Le plancher est également renforcé par un petit cartilage nasal accessoire (Figure 1). L'aile, la partie dorsolatérale épaissie de la narine, est la partie la plus mobile. Chez les chiens, les narines ont une forme de virgule, avec une queue recourbée latéralement sous l'aile. (Singh, 2017)

Différents muscles, comme le muscle dilatateur des narines et le muscle releveur naso-labial, aident à réguler le flux d'air entrant. (Evans et de Lahunta, 2013)

Les narines correspondent à l'ouverture sur le vestibule nasal, ce dernier est largement oblitéré par la grande extrémité bulbeuse du pli alaire. L'extrémité du pli alaire étant fusionnée à la surface médiane de l'aile de la narine, cela permet donc d'orienter le flux d'air entrant vers différentes régions des cavités nasales. (Evans et de Lahunta, 2013)

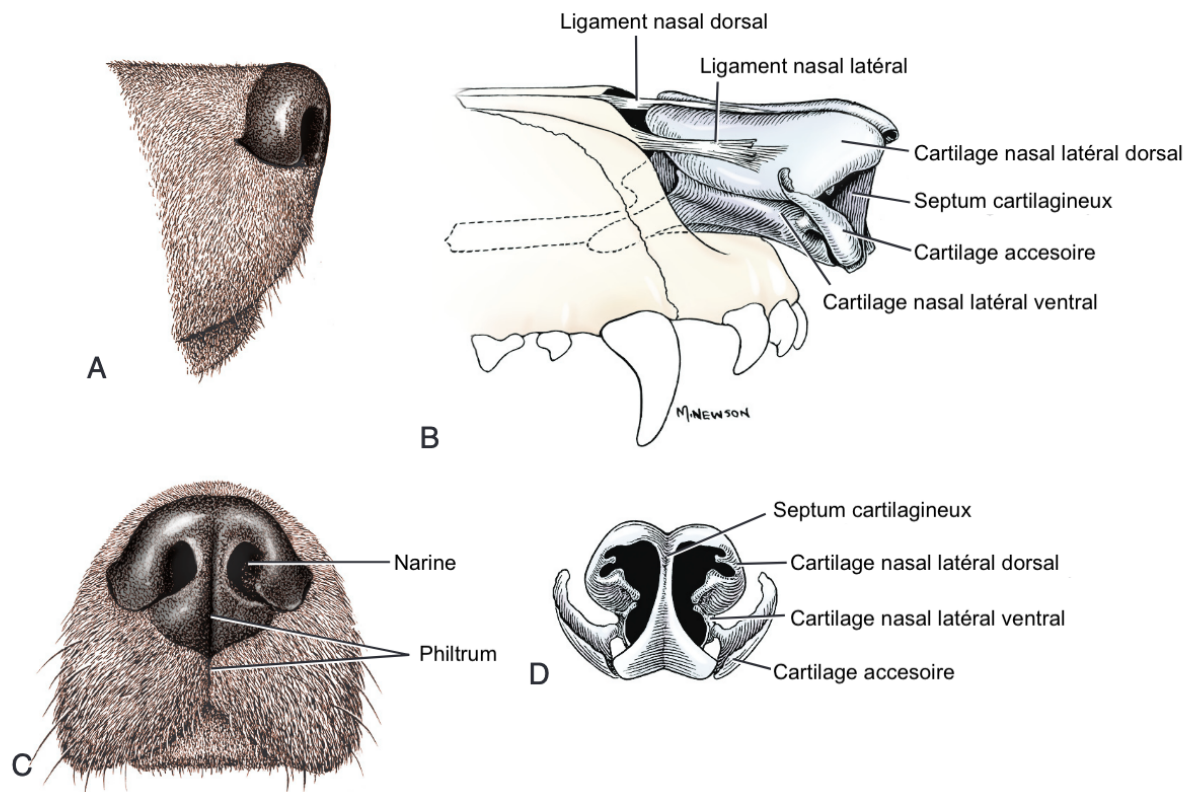


Figure 1 : Nez externe et cartilages nasaux (d'après Evans et de Lahunta, 2013)

A, Nez, vue latérale. B, Cartilages nasaux, vus comme dans A.
C, Nez, vue rostrale. D, Cartilages nasaux, vus comme dans C.

b. Cavités nasales

Chaque cavité nasale possède une région respiratoire permettant de réchauffer et d'humidifier l'air ainsi qu'une région olfactive. (Evans et de Lahunta, 2013)

Les cavités nasales s'étendent du vestibule nasal à la lame criblée de l'os ethmoïde qui permet la séparation avec la cavité crânienne. A l'extrémité caudale, le méat naso-pharyngien permet la communication avec le nasopharynx (Figure 2). Les cavités nasales droite et gauche sont séparées par le septum nasal, qui est en grande partie cartilagineux mais ossifié dans sa partie la plus caudale correspondant à la lame perpendiculaire de l'os ethmoïde (Figure 2). (Evans et de Lahunta, 2013 ; Singh, 2017)

Les cornets nasaux correspondent à des lames fragiles de cartilage enroulées qui composent presque entièrement la cavité nasale. Ils comprennent un système caudal (cornets ethmoïdaux) et un système rostral (nasal) dans lequel prédominent de grands cornets nasaux dorsaux et ventraux ainsi qu'un petit cornet nasal moyen. Le cornet dorsal mène directement au fond de la cavité nasale et apporte l'air à la muqueuse olfactive. Le cornet moyen donne généralement accès au système sinusal. Les méats ventral et commun constituent la principale voie aérienne menant au pharynx (Figures 2 et 3). (Singh, 2017)

Les sécrétions aqueuses des glandes lacrymales, nasales latérales (Figure 3) et des glandes nasales mineures dispersées humidifient la plaque nasale. La cavité nasale est extrêmement bien irriguée par les artères carotides externes, dont l'artère maxillaire et l'artère sphéno-palatine. (Singh, 2017)

Globalement, les cornets nasaux et leur structure en labyrinthe permettent d'augmenter la surface de contact de l'air avec la muqueuse.

c. Sinus paranasaux

Le système sinusal du chien est peu développé. Il contient deux types de sinus paranasaux, les sinus maxillaires et frontaux. Le système frontal, le plus grand, est divisé en deux par le septum médian dont chacune est constituée de trois cavités (latérale, médiale et rostrale) qui communiquent séparément avec la cavité nasale par des ouvertures nasofrontales (méats ethmoïdaux). Le sinus maxillaire occupe la partie caudolatérale de la mâchoire supérieure, au-dessus des molaires caudales et communique librement avec la cavité du nez (Figure 4). (Singh, 2017)

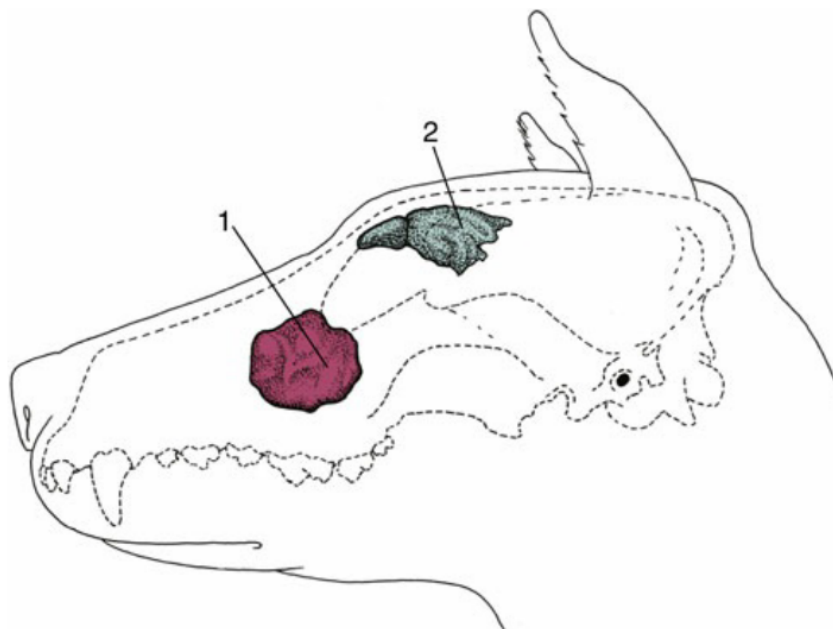


Figure 4 : Sinus paranasaux chez le chien (d'après Singh, 2017)

1 : récessus maxillaire ; 2 : sinus frontal

d. Organe voméronasal

L'organe voméronasal est constitué de deux conduits étroits et parallèles qui sont encastrés dans le palais dur, un de chaque côté de sa jonction avec la cloison nasale (Figure 5). Les conduits, qui sont soutenus latéralement, ventralement et médialement par de fins cartilages, sont tapissés en partie de muqueuse olfactive. Rostralement, ils s'ouvrent dans les conduits incisifs, qui chez la plupart des mammifères, relient les cavités nasale et orale par des ouvertures dans le palais dur. (Salazar *et al.*, 2013 ; Singh, 2017)

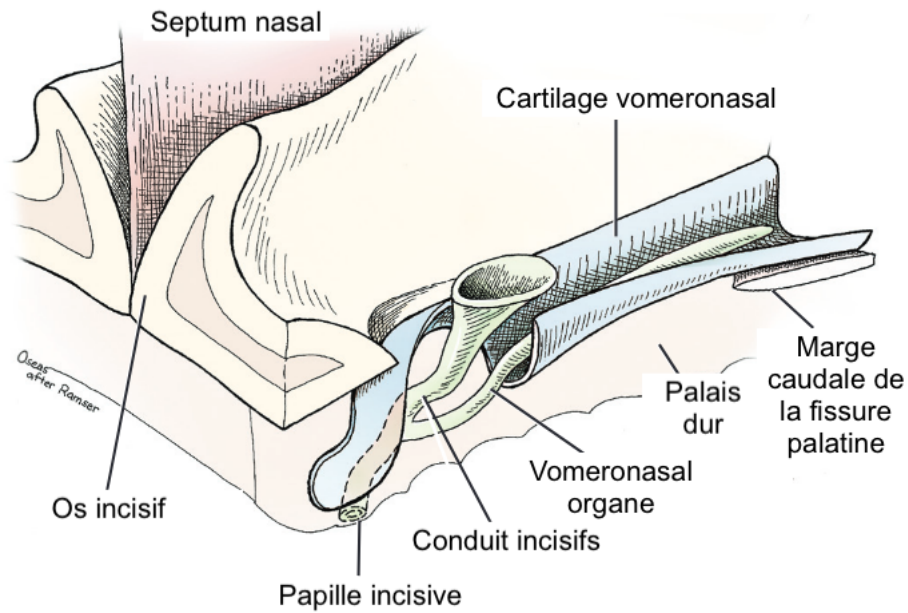


Figure 5 : Vue schématique du canal incisif et de l'organe voméronasal (d'après Evans et de Lahunta, 2013)

Il a pu être démontré que l'organe voméronasal était composé de zones présentant des récepteurs et d'autres zones de non-récepteurs. De plus, les voies neuronales utilisées pour transmettre des stimuli de la muqueuse voméronasale au cerveau sont distinctes de celles de la muqueuse olfactive normale. La nature olfactive de cet organe chez les mammifères a été longtemps soupçonnée, et maintenant nous savons qu'il joue un rôle dans le comportement sexuel et la reconnaissance des parents par l'intermédiaire de phéromones.

e. Centres de l'olfaction

L'innervation des cavités nasales est permise par le nerf nasal, le nerf ethmoïdal, le nerf voméronasal ainsi que les nerfs olfactifs. Ils permettent de relier la muqueuse olfactive à la face ventrale du bulbe olfactif (Figure 6).

Les nerfs olfactifs, qui constituent le premier nerf crânien, sont formés de nombreux axones non myélinisés, qui se trouvent à la fois dans l'épithélium olfactif et la moitié du labyrinthe éthmoïdal. Les axones de ces cellules olfactives rejoignent les bulbes olfactifs du cerveau en traversant la lame criblée de l'éthmoïde, profondément dans la partie caudale de la cavité nasale. Le court parcours et cette localisation profonde des nerfs les protègent contre les blessures accidentelles (Figure 6). Ils peuvent tout de même être impliqués dans des maladies infectieuses ou néoplasiques mais en général, un défaut d'odorat sera le plus souvent due au blocage des passages d'air menant à la muqueuse olfactive (Evans et de Lahunta, 2013 ; Singh, 2017).

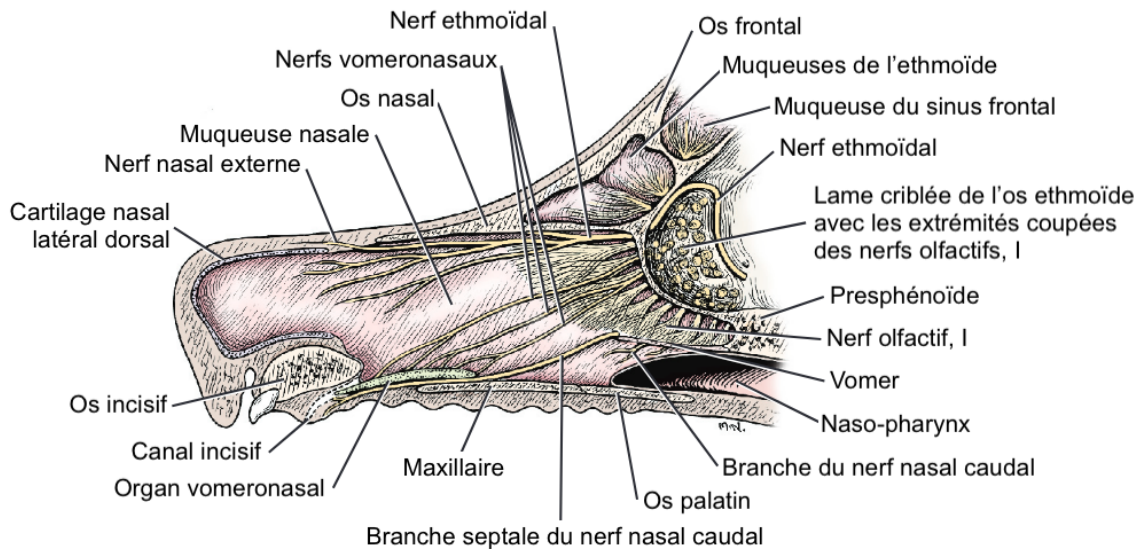


Figure 6 : Coupe sagittale du nez montrant la répartition des nerfs de l'olfaction (d'après Evans et de Lahunta, 2013)

Le bulbe olfactif, centre olfactif primaire, est situé sur la partie rostroventrale du rhinencéphale. Il est en continué avec les autres structures du rhinencéphale grâce au pédoncule olfactif et permet donc la liaison avec les centres olfactifs secondaires, dont le cortex olfactif fait partie (Figure 7).

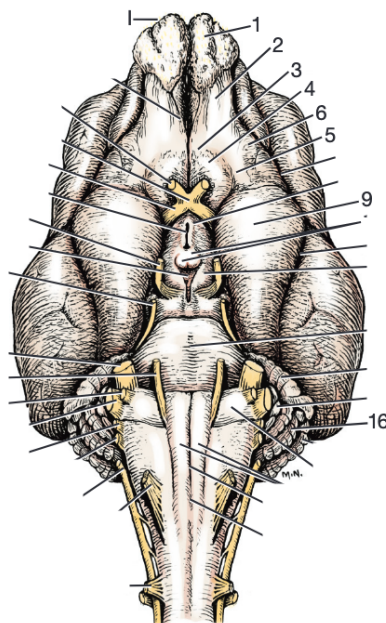


Figure 7 : Vue ventrale simplifiée du cerveau et des voies de l'olfaction (d'après Evans et de Lahunta, 2013)

1. Nerf olfactif 1. Bulbe olfactif 2. Pédoncule olfactif 3. Voie olfactive médiale 4. Tubercule olfactif 5. Voie olfactive latérale 6. Circulation olfactive latérale 9. Lobe piriforme 16. Hémisphère cérébelleux

B. Histologie du système olfactif

Chez les animaux dotés d'un odorat bien développé, l'organe olfactif consiste en une zone relativement large de muqueuse olfactive recouvrant la paroi latérale et les cornets ethmoïdaux principalement dans la partie caudale de la cavité nasale.

a. Muqueuse olfactive, système olfactif principal

La muqueuse nasale tapisse la totalité des cavités nasales. Elle comprend une région respiratoire ainsi qu'une région olfactive (Figure 8). Cette dernière est constituée d'un épithélium hautement spécialisé appelé neuroépithélium puis du chorion séparé de l'épithélium par une lame basale. De plus, la région olfactive est revêtue d'une couche de mucus et recouvre les volutes ethmoïdales et une partie des sinus paranasaux. (Barone, 1997)

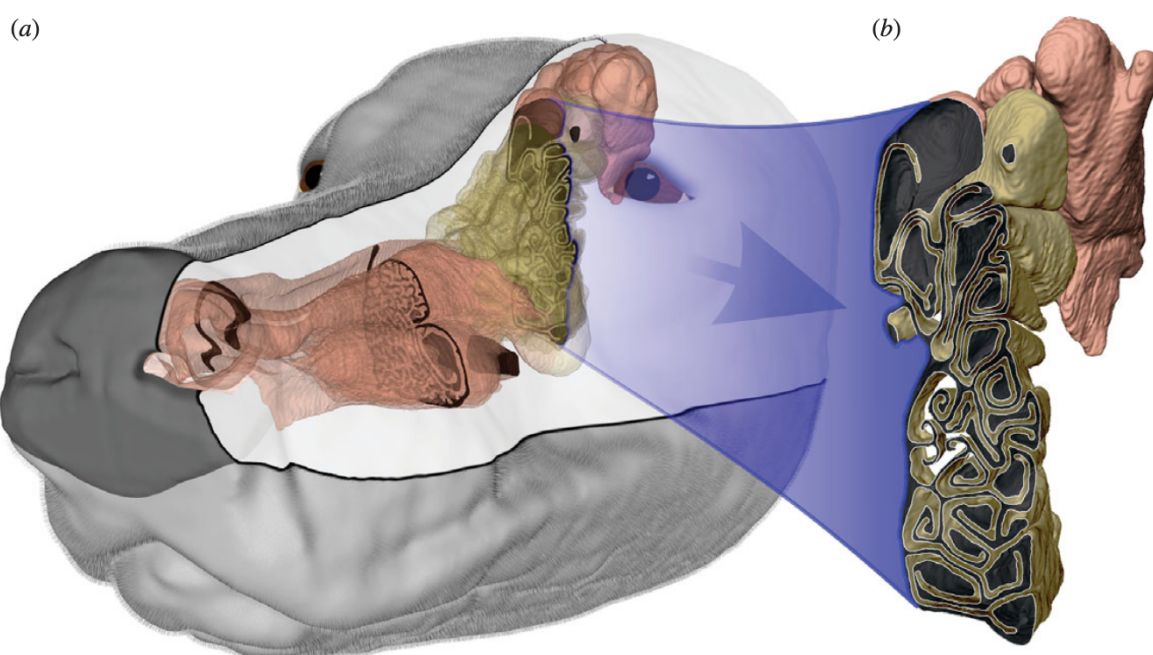


Figure 8 : Les voies nasales canines (d'après Craven *et al.*, 2010)

(a) Modèle tridimensionnel des voies nasales canines gauches, reconstruites à partir d'IRM haute résolution.

(b) Le récessus olfactif est situé à l'arrière de la cavité nasale et contient des volutes ethmoïdales tapissées d'épithélium olfactif.

Les régions olfactives (jaunâtre) et respiratoires (roses) représentées ici correspondent respectivement aux emplacements approximatifs de l'épithélium sensoriel (olfactif) et non sensoriel (squameux, transitionnel et respiratoire)

À titre d'exemple, la muqueuse olfactive du berger allemand couvrirait une surface de 150 cm² et posséderait plus de 20 millions de récepteurs, alors qu'elle ne s'étend que sur 2 à 3 cm² chez l'homme. (Singh, 2017)

La muqueuse olfactive possède un épithélium cylindrique pseudostratifié. Ce dernier comporte trois types de cellules épithéliales (Figure 9) : (Barone, 1997 ; Collin, 2003)

- Les cellules neurosensorielles ou olfactives

Ce type de cellules épithéliales est le plus nombreux, entre 100 à 200 millions chez le chien. Ce sont des cellules neurosensorielles bipolaires, similaires aux photorécepteurs de la rétine, d'une durée de vie maximale de 100 jours. Leurs dendrites atteignent la surface de l'épithélium et se terminent par une vésicule olfactive composée d'une multitude de cils sensoriels en contact avec l'air de la cavité nasale. Ils permettent d'augmenter la surface réceptrice et contiennent les neurones olfactifs ainsi que les enzymes clés de la cascade de signalisation permettant la transduction du signal olfactif. Les axones des cellules franchissent la lame basale et se combinent alors pour former les faisceaux du nerf olfactif qui traversent la lame criblée jusqu'au bulbe olfactif situé à l'extrémité rostrale du cerveau. (Singh, 2017)

- Les cellules de soutien :

Les cellules de soutien sont prismatiques et s'étendent sur toute la hauteur de l'épithélium olfactif. La partie profonde repose sur la lame basale tandis que la partie superficielle comporte de nombreuses microvillosités dirigées vers la lumière nasale. Ces cellules apportent un soutien structural aux cellules neurosensorielles, et sont impliquées dans la phagocytose des neurones morts et dans la transformation des substances odorantes et xénobiotiques. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

- Les cellules basales :

Les cellules basales sont apposées contre la lame basale en une couche profonde et unique. D'une importance capitale, elles sont à l'origine de la neurogénèse continue des neurones olfactifs.

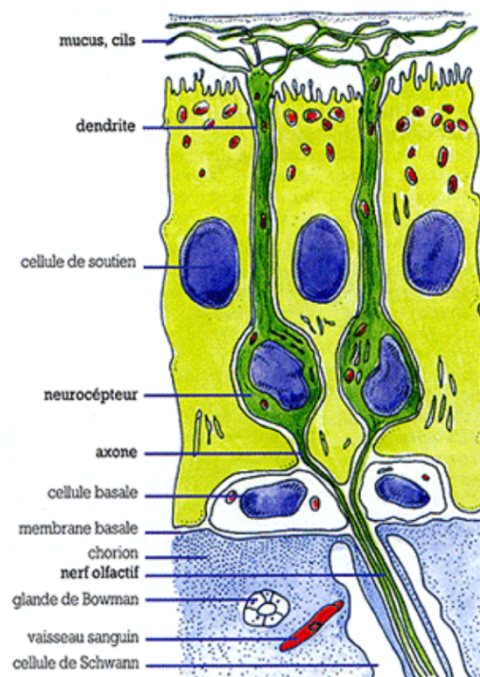


Figure 9 : Coupe transversale de l'épithélium olfactif (d'après Vadurel et Gogny, 1997)

Des glandes olfactives séreuses, dont les glandes de Bowman, sont situées dans le chorion et permettent l'humidification de la surface de l'épithélium par la sécrétion de mucus. Ce dernier assure donc un rôle de protection du neuroépithélium contre la dessiccation, une aide au transport de molécules odorantes jusqu'aux récepteurs olfactifs mais aussi un rôle d'élimination des odeurs précédemment perçue afin d'éviter une saturation des récepteurs. (Barone, 1997 ; Singh, 2017). Les interactions entre les molécules odorantes et récepteurs olfactifs sont favorisés par une famille de protéines les *odorant-binding-proteins* ou OBP. Les OBP sont synthétisés dans l'organe voméronasal ainsi que dans les glandes olfactives séreuses et appartiennent à la famille des lipocalines, protéines permettant le transport de molécules lipophiles. Les OBP permettraient donc la solubilisation des molécules odorantes hydrophobes présentes dans le mucus pour les conduire aux récepteurs olfactifs (Figure 13). (Pelosi et Knoll, 2022)

Enfin, le derme de la peau nasale est composé de fibres réticulaires, collagènes et élastiques, ainsi que de fibroblastes, de vaisseaux sanguins et de nerfs. Les vaisseaux sanguins et les nerfs ont une taille plus importante dans les couches profondes du derme. (Evans et de Lahunta, 2013)

b. Centres olfactifs primaire et secondaire

Le système olfactif est schématiquement constitué de trois couches successives : les neurones récepteurs olfactifs, le bulbe olfactif (centre olfactif primaire) et le cortex olfactif (centre olfactif secondaire).

Le bulbe olfactif est composé de sept couches différentes. Situées en profondeur après la lame criblée de l'ethmoïde, on peut citer de la couche la plus externe à la couche la plus interne (Figure 10) :

- La couche des fibres olfactives, comprenant les fibres des nerfs olfactifs
- La couche des glomérules, caractérisée par la présence de synapses entre les nerfs olfactifs et les dendrites axiales des cellules mitrales et des cellules à panache des couches plus profondes. Ces synapses sont appelées glomérules.
- La couche plexiforme externe, traversée par les dendrites des cellules mitrales, dont le trajet part des glomérules de la couche supérieure. De plus, on y trouve en très grand nombre les cellules à panache.
- La couche des cellules mitrales, neurocytes de gros diamètre mais présent en faible quantité. Ils sont en forme de triangle dont la pointe, dirigée vers la profondeur, se prolonge par un axone ; au contraire, la base du triangle donne la dendrite axiale qui se prolonge jusqu'aux glomérules.
- La couche plexiforme interne est occupée par les dendrites des cellules granulaires ainsi que par les axones des cellules mitrales et des cellules à panache.
- La couche des grains, couche la plus épaisse, possède de nombreuses cellules granulaires qui émettent uniquement des dendrites permettant la synapse avec des dendrites basales des cellules mitrales et des cellules à panache.
- La substance blanche est la couche la plus profonde et est formée par les axones des cellules mitrales et des cellules à panache.

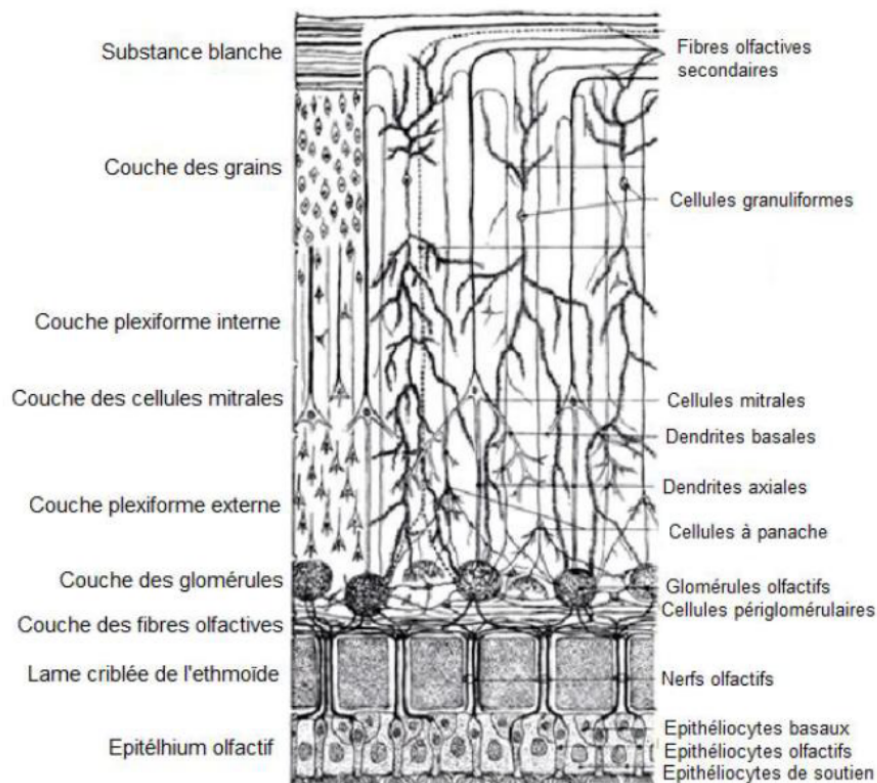


Figure 10 : Structure du bulbe olfactif (d'après Barone, 2004)

Le bulbe olfactif joue un rôle à la fois modulateur et sensoriel. Il est impliqué dans le traitement initial et le filtrage des informations olfactives, permettant la discrimination entre les odeurs, ainsi que l'amélioration de la sensibilité de la détection des odeurs. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Le bulbe olfactif se poursuit ensuite par le pédoncule olfactif, composé des axones des cellules mitrales et des cellules à panache, qui rejoint alors les centres olfactifs secondaires au niveau du néocortex, au niveau du système limbique, ainsi que du diencephale avec un relais thalamique ou hypothalamique (Figure 16). (Singh, 2017)

2. Physiologie de l'olfaction

Dans des conditions normales d'inspiration, les courants respiratoires et olfactifs de l'air sont associés. Quand un chien veut délibérément échantillonner l'environnement, les narines sont dilatées et l'inspiration forcée. Cet acte fournit un plus grand volume d'air inspiré, qui prend une course plus dorsale autour des cornets ethmoïdaux, où les récepteurs olfactifs sont les plus nombreux. (Evans et de Lahunta, 2013)

Dans cette partie, nous étudierons les grands principes de la physiologie de l'olfaction, nécessaires à la compréhension du travail olfactif canin.

A. Flux d'air et transport de molécules odorantes jusqu'à l'appareil olfactif

Le nez canin étant responsable des fonctions respiratoires et olfactives dont les objectifs diffèrent, des voies d'écoulement distinctes pour chacune de ces fonctions sont donc retrouvées (Figure 11).

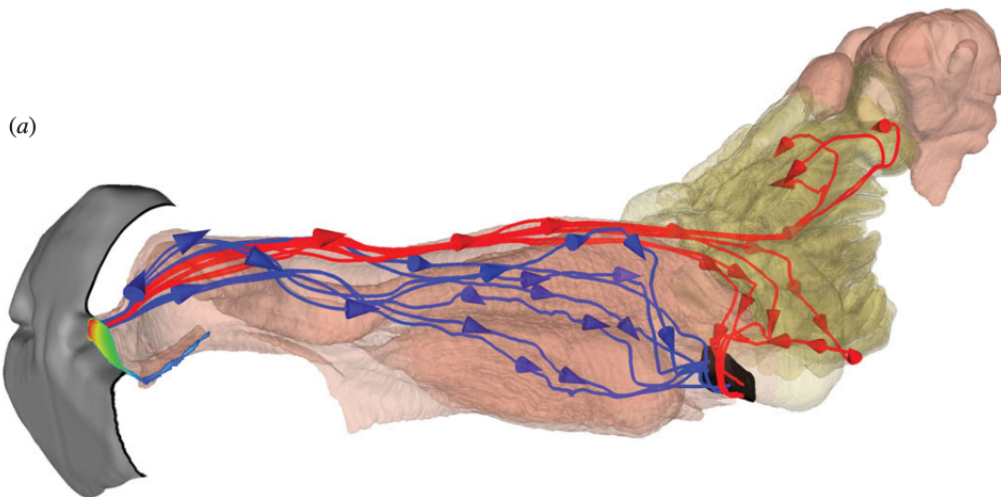


Figure 11 : Dynamique intranasale des fluides de l'olfaction canine (d'après Craven *et al.*, 2010)

Trajectoires d'écoulement respiratoire et olfactif distinctes dans la cavité nasale :
Lignes rouges, trajectoires olfactives ; lignes bleues, trajectoires respiratoires.

Lors du reniflement, l'air à environ un centimètre de la narine est attiré et un flux d'air est transporté vers les cavités nasales. Le flux d'air supérieur, correspondant à environ 12 à 13 % de chaque respiration, va directement vers la région olfactive, où les molécules odorantes se déposent et s'accumulent. Les odorants hautement solubles sont déposés le long du méat dorsal où les récepteurs olfactifs sensibles à ces odorants sont exprimés, tandis que les odorants insolubles sont déposés sur l'ensemble de la cavité olfactive où les récepteurs olfactifs correspondants sont principalement exprimés. Le chien moyen inhale trente millilitres d'air par narine et par reniflement, et l'air est inspiré par l'avant et expiré sur le côté permettant un échantillonnage plus efficace des odeurs. (Jenkins *et al.*, 2018 ; Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Le reste de l'air, présent dans la voie inférieure, suit le nasopharynx jusqu'aux voies respiratoires inférieures. Les facteurs anatomiques et physiologiques permettent la turbulence du flux d'air nasal et influencent l'humidification, le réchauffement et le trajet de l'air inspiré. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021 ; Siniscalchi *et al.*, 2011)

Ce cheminement du flux d'air nasal pendant l'inhalation permet l'acquisition d'échantillons d'odeurs séparés dans chaque narine, et ainsi une comparaison bilatérale de l'intensité du stimulus et de la localisation de la source d'odeur. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021 ; Siniscalchi *et al.*, 2011)

De plus, il a pu être démontré le phénomène de latéralisation du reniflement observé chez le chien. En effet, ils ont une forte tendance à renifler d'abord par la narine droite puis si l'odeur s'avère être une odeur familière ou non aversive, ils passent à la narine gauche. Cependant, si les stimuli s'avèrent nouveaux, menaçants ou excitants, le chien continue à n'utiliser que la narine droite. Cela peut être mis en lien avec la théorie selon laquelle l'hémisphère droit contrôle le traitement des nouvelles informations, l'hémisphère gauche prenant alors en charge les réponses comportementales aux stimuli familiers. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021 ; Siniscalchi *et al.*, 2011)

Enfin, le flux d'air entrant est réduit par l'exercice, l'hypercapnie et l'augmentation du tonus sympathique, tandis qu'il est augmenté par l'air froid, les irritants chimiques, l'hypocapnie et l'augmentation du tonus parasympathique. (Jenkins *et al.*, 2018)

B. Étapes de la perception des odeurs

Dans cette partie, nous étudierons en détails les étapes successives de la perception d'une odeur, depuis la détection de la molécule odorante jusqu'à l'intégration de l'influx nerveux en découlant (Figure 12).

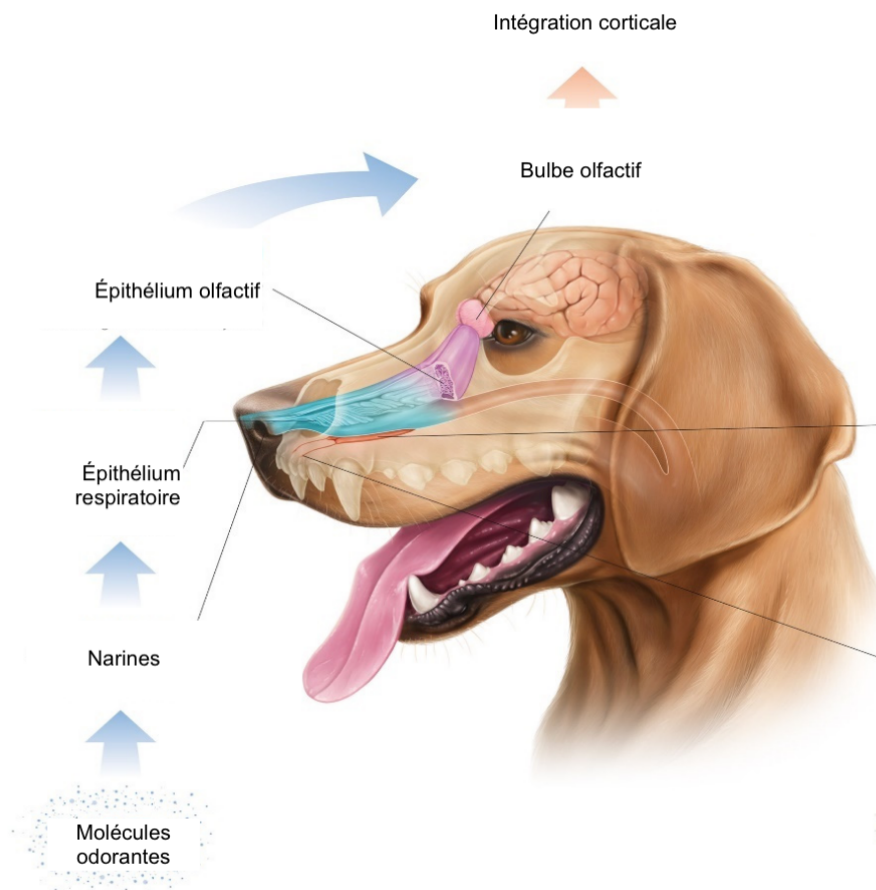


Figure 12 : Schéma simplifié global des étapes de la perception d'une odeur (d'après Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

a. De la molécule odorante aux récepteurs olfactifs

Comme nous l'avons vu précédemment, les interactions entre les molécules odorantes et récepteurs olfactifs sont favorisées par une famille de protéines de liaison, les *odorant-binding-proteins* ou OBP, synthétisés dans l'organe voméronasal ainsi que dans les glandes olfactives séreuses. Les OBP permettraient la solubilisation des molécules odorantes hydrophobes présentes dans le mucus pour les conduire aux récepteurs olfactifs (Figure 13). (Pelosi et Knoll, 2022 ; Zarzo, 2007)

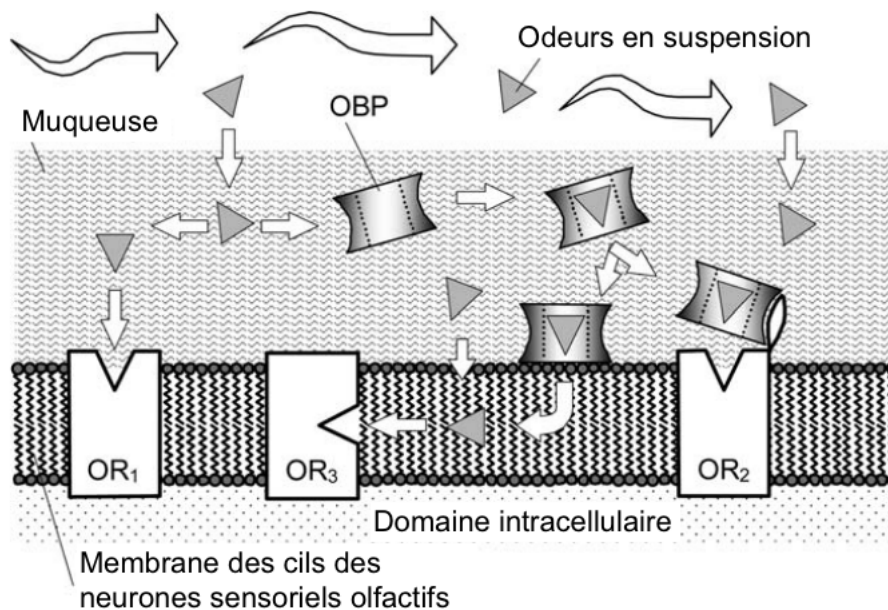


Figure 13 : Transport des substances odorantes vers le site de liaison des récepteurs olfactifs (OR) avec l'aide des OBP (d'après Zarzo, 2007)

- OR1 : récepteurs activés par des substances hydrophiles, le site de liaison est supposé faire face au domaine extracellulaire.
- OR2 : les OBP chargées en substances odorantes interagissent avec les boucles extracellulaires du récepteur, de sorte que le ligand transporté peut atteindre le site de liaison.
- OR3 : le ligand est transporté vers la membrane puis diffuse latéralement pour atteindre un site d'entrée spécifique dans le récepteur.

b. Récepteurs olfactifs

Les molécules odorantes se lient sur les récepteurs des cellules sensorielles présents dans l'épithélium olfactif, de façon réversible grâce à des liaisons de faible énergie. C'est la première étape vers la genèse d'un signal électrique. (Holley, 2006)

Les cellules réceptrices olfactives présentent des cils à leur surface composés de récepteurs olfactifs capable de se lier avec la molécule odorante. Ces récepteurs olfactifs sont des récepteurs couplés aux protéines G. De nature protéique, ils sont composés de sept hélices transmembranaires hydrophobes qui se regroupent les unes contre les autres pour former un site de liaison extracellulaire, en contact avec la couche de mucus, adapté à la structure tridimensionnelle d'une molécule odorante (Figure 13). Du côté intracytoplasmique, un site de liaison permet le couplage à une protéine G. Lors de la liaison, le récepteur olfactif subit un changement structurel qui active un sous-type de protéine G spécifique à l'olfaction, qui à son tour active une cascade d'événements qui conduisent à l'élaboration du signal nerveux (Figure 15). De plus, on peut noter que les récepteurs olfactifs fonctionnels sont susceptibles d'initier un signal de rétroaction afin de garantir qu'aucun autre type de récepteur olfactif ne sera exprimé dans une cellule réceptrice olfactive. (Buck, 2005 ; Munger *et al.*, 2009 ; Zarzo, 2007).

Il a été démontré qu'un type de récepteurs olfactif peut reconnaître plusieurs substances odorantes et qu'une substance odorante unique suscite des réponses de plusieurs récepteurs, ce qui donne lieu à un schéma de codage combinatoire extrêmement complexe pour la reconnaissance des substances odorantes (Figure 14) (Buck, 2005 ; Zarzo, 2007). On pense que le nombre de cellules réceptrices olfactives activées est responsable de la détermination de l'intensité de l'odeur, bien que cette relation ne soit pas linéaire. De plus, l'intensité de l'odeur dépend de facteurs externes supplémentaires tels que la durée d'exposition à l'odeur et sa concentration. Des essais expérimentaux ont révélé que le répertoire des récepteurs olfactifs activés par une substance odorante est plus diversifié à des concentrations plus élevées, suggérant que de nouveaux récepteurs sont activés à des concentrations plus élevées. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021 ; Munger *et al.*, 2009 ; Zarzo, 2007)

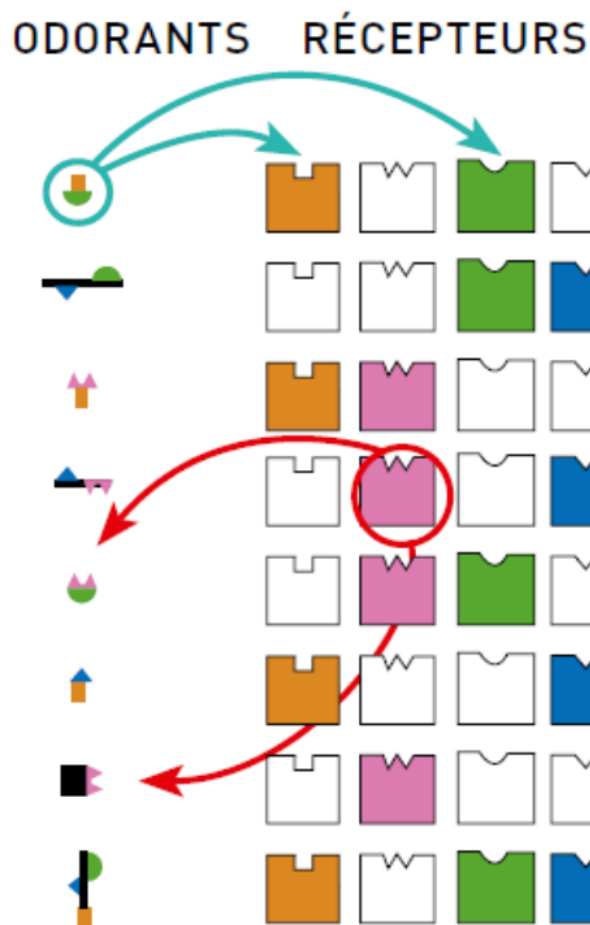


Figure 14 : Interaction entre les molécules odorantes, à gauche, et les récepteurs olfactifs, à droite selon différents schémas combinatoires (d'après Ache et Young, 2005)

Finalement, le système olfactif principal est extrêmement complexe. Il existe une hétérogénéité fonctionnelle qui suggère que le système olfactif principal contient plusieurs sous-systèmes olfactifs qui remplissent des rôles chimiosensoriels spécifiques. Grâce à une variabilité de récepteurs chimiosensoriels, d'enzymes et de canaux ioniques spécifiques qui permettent l'établissement de connexions distinctes dans le bulbe olfactif principal. (Munger *et al.*, 2009)

c. Transduction du signal olfactif

La transduction du signal olfactif est permise par une cascade de réactions enzymatiques après liaison entre le récepteur olfactif et la molécule odorante. La première étape consiste en l'activation d'une protéine G après fixation de la molécule odorante. S'ensuit alors une série de réactions qui aboutissent à la production d'un second messenger, l'AMPc (adénosine monophosphate cyclique) ou l'IP3 (inositol triphosphate) permettant l'ouverture de canaux cationiques, et la libération respectivement selon le second messenger, d'un messenger sodique ou calcique. Ce flux d'ions provoque alors une dépolarisation de la membrane cellulaire permettant ainsi l'élaboration d'un potentiel d'action (Figure 15). (Ache et Young, 2005 ; Holley, 2006)

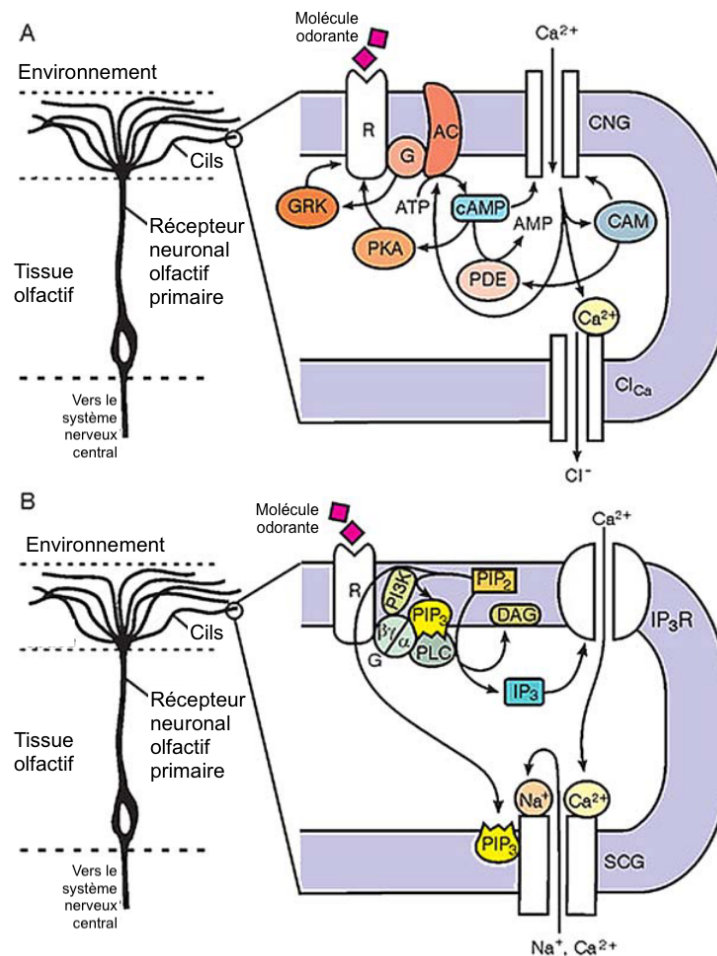


Figure 15 : Cascades de signalisation simplifiées intracellulaire impliquées dans la transduction chimiosensorielle (d'après Ache et Young, 2005)

(A) Diagramme de la signalisation via l'AMPc.

(B) Diagramme de la signalisation via l'IP3.

d. Transmission du signal olfactif

Les influx nerveux, somme de potentiels d'action, émanent des neurones sensoriels olfactifs exprimant le même récepteur olfactif et convergent vers un ou deux glomérules du bulbe olfactif,

composé de milliers de glomérules. Au sein de ces glomérules, lieux de contacts synaptiques très denses, les axones des cellules réceptrices transmettent les influx nerveux aux cellules-relais, les cellules mitrales, permettant l'envoi du signal afférent (Figure 16). Le fait qu'une grande population de neurones sensoriels olfactifs converge vers le même glomérule produit un meilleur rapport signal/bruit et augmente la sensibilité effective au stimulus. Ainsi, cela suggère que le glomérule, et non le récepteur, est l'unité fondamentale du codage des odeurs. (Buck, 2005 ; Holley, 2006 ; Munger *et al.*, 2009 ; Zarzo, 2007)

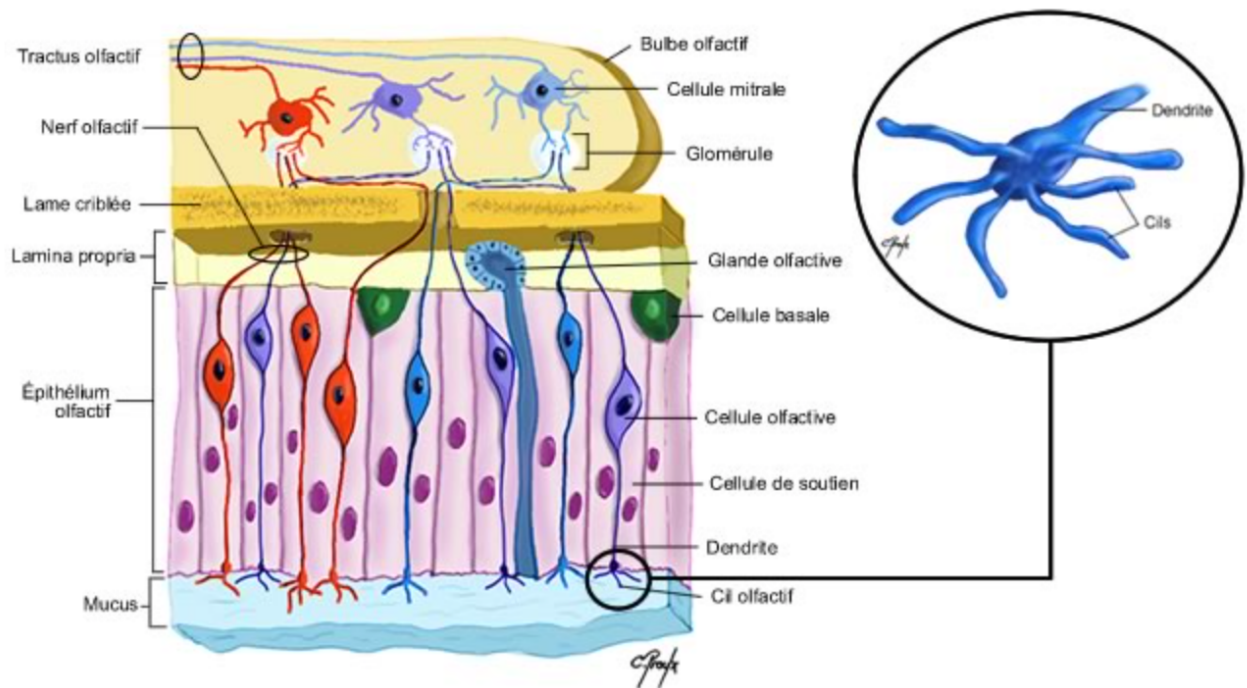


Figure 16 : Schématisation du système olfactif jusqu'à la transmission du signal olfactif (d'après Salveco, 2024)

e. Intégration centrale de l'information périphérique

Par rapport aux autres sens, où la voie sensorielle est croisée, les voies olfactives mènent de manière ipsilatérale de la zone de détection située dans la cavité nasale à la zone de perception dans le cerveau, ce qui signifie que la narine droite est la source des signaux pour l'hémisphère cérébral droit, et les récepteurs situés dans la narine gauche transmettent les impulsions à l'hémisphère gauche. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

De manière très simplifiée, les axones des cellules mitrales du bulbe olfactif rejoignent ainsi différentes aires du cortex olfactif primaire, où se situent les cellules pyramidales. Ces dernières forment des ramifications de synapses excitatrices, plus ou moins lointaines jusqu'au cortex. Il peut être intéressant de noter que le cortex piriforme, région du cortex olfactif primaire, ainsi que le bulbe olfactif contiennent des synapses à récepteurs au N-méthyl-D-aspartate (NMDA), neurotransmetteur impliqué dans les apprentissages. Ainsi, on peut en conclure que ces structures sont aptes à garder la trace d'évènements sensoriels. De nouvelles projections sont ensuite formées depuis le cortex

olfactif primaire vers des structures corticales et sous-corticales. On peut par exemple citer le cortex frontal orbitaire, l'hippocampe, l'hypothalamus, l'amygdale permettant ainsi la détection, la mémorisation ou une action découlant de l'identification d'une odeur (Figure 17). (Buck, 2005 ; Holley, 2006 ; Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

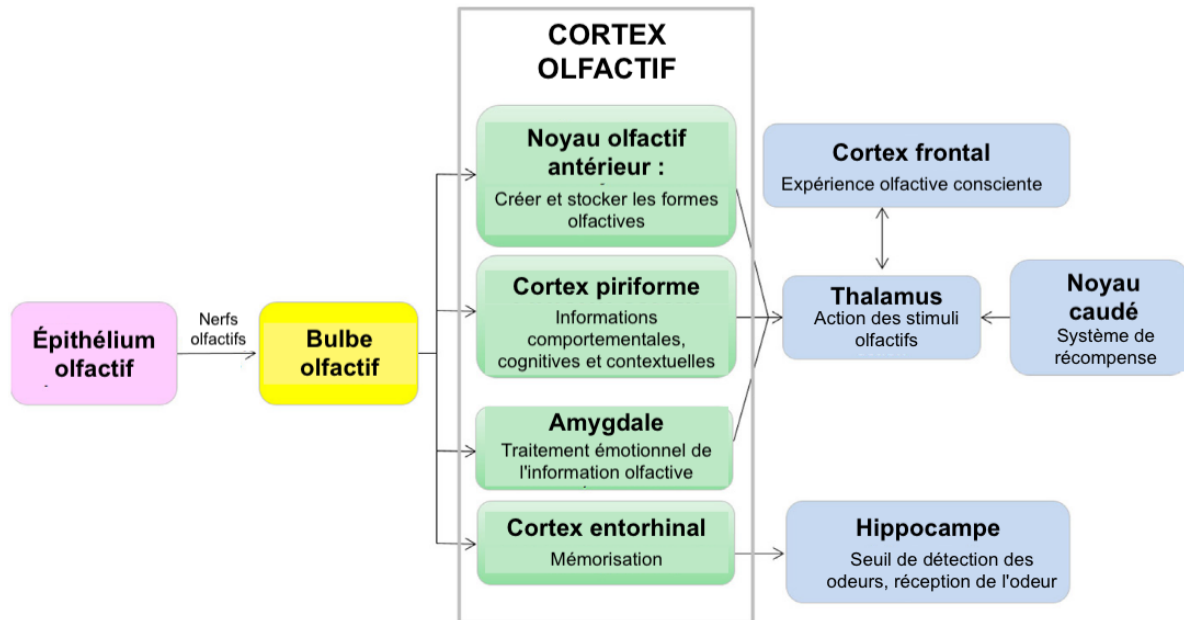


Figure 17 : Schéma de la voie centrale d'intégration d'information olfactive (d'après Jenkins *et al.*, 2018)

C. Caractéristiques de l'olfaction

Le système olfactif dans son ensemble est un système en constante évolution, comprenant différents seuils de détection ou de reconnaissance. Des phénomènes de progression, d'adaptation ou de fatigue de ce système ont pu être décrits. Ces caractéristiques sont ainsi importantes à prendre en compte lors de la formation de jeunes chiens par exemple.

a. Seuil de détection,

Le seuil de détection olfactive est la plus faible concentration d'un stimulus odorant qu'un individu peut détecter de manière fiable à partir d'un échantillon vierge, et il peut varier d'un individu à l'autre et selon le type d'odeur. Chez les chiens, le seuil de détection se situe entre des parties par milliard (ppb) et des parties par trillion (ppt) pour divers composés chimiques, voire à une concentration molaire bien inférieure pour certaines molécules. Pour quantifier la détection olfactive, il est essentiel de prendre en compte ce seuil, en dessous duquel une odeur est indétectable.

Les performances des chiens en matière de détection peuvent être influencées par le polymorphisme génétique des récepteurs olfactifs, la proportion de gènes fonctionnels par rapport aux gènes non fonctionnels, la capacité de l'individu à se concentrer sur la recherche, un

tempérament adapté aux exigences élevées de l'entraînement à la détection, les capacités d'apprentissage individuelles et la motivation. (Concha *et al.*, 2019 ; DeGreeff et Schultz, 2022)

Des études ont tenté de mesurer précisément les seuils de détection, mais les résultats sont souvent difficiles à comparer en raison de divergences dans les méthodes et les conditions de test. De plus, les méthodes imprécises d'introduction des échantillons et de diffusion des odeurs ne permettent pas de déterminer la concentration exacte d'odorant qu'un chien subit pendant les tests. Enfin, les disparités dans les études peuvent également découler des méthodes de formation des chiens, de leur familiarité avec les odorants, et de variations individuelles entre chiens. (DeGreeff et Schultz, 2022)

b. Seuil de reconnaissance

Dans le domaine de la détection canine, le seuil de reconnaissance correspond à la plus faible quantité d'odorant nécessaire pour être identifiée comme une odeur spécifique connue. Par exemple, dans un contexte de recherche, un chien peut détecter une odeur faible, mais ne pas la reconnaître comme une odeur cible, la percevant plutôt comme indistincte. Cette concentration est donc supérieure au seuil de détection, mais inférieure au seuil de reconnaissance. Si l'intensité de l'odeur augmente et que le chien l'identifie comme une odeur cible, elle dépassera alors le seuil de reconnaissance. Ce seuil peut être influencé par d'autres odeurs présentes, qui rendent la discrimination plus difficile. (DeGreeff et Schultz, 2022)

c. Progression

De nombreuses études sur l'apprentissage olfactif montrent qu'un animal entraîné à détecter une odeur est mieux capable de la distinguer des odeurs de fond. L'exposition répétée joue donc un rôle crucial dans le développement de la sensibilité olfactive, contribuant à améliorer l'acuité olfactive. Ainsi, un individu devient capable de détecter des odeurs à des seuils beaucoup plus bas qu'au début de son entraînement. (Concha *et al.*, 2019)

d. Adaptation

Un stimulus olfactif prolongé ou une exposition à de nombreux stimuli olfactifs rapprochés peuvent progressivement augmenter le seuil de perception olfactive chez le chien, entraînant éventuellement une perte de la sensation olfactive. Ce phénomène est connu sous le nom d'adaptation et est spécifique à chaque substance odorante, l'organe olfactif restant sensible aux autres odeurs. (Vadurel et Gogny, 1997)

e. Phénomène de fatigue

Si l'intensité du stimulus dépasse le seuil de perception, la sensation olfactive augmente, mais plus lentement que l'intensité du stimulus, avant de diminuer rapidement et finalement disparaître, phénomène appelé fatigue olfactive. Cela peut être dû à une désactivation temporaire des récepteurs, résultant d'une dépolarisation excessive ou d'une saturation, ce qui réduit la transmission du signal au bulbe olfactif. La récupération de la sensibilité olfactive normale peut prendre de trois à quatre minutes, parfois jusqu'à trente minutes. Ce phénomène a des implications importantes pour le travail des chiens de recherche, nécessitant une alternance entre phases de travail et de repos, car la fatigue olfactive peut survenir après une à deux heures d'effort intensif. (Vadurel et Gogny, 1997)

3. L'odorat du chien au service de l'homme

Après avoir étudié en détail l'anatomie et la physiologie de l'olfaction, nous allons aborder en quoi cet odorat aux capacités hors normes représente un avantage précieux pour l'Homme.

A. L'odorat ou plus précisément le reniflement

Pour comprendre le processus de détection olfactive, il est important de faire la distinction entre le reniflement et l'odorat. L'odorat est un processus implicite, inconscient et sans effort, qui accompagne la respiration et attire l'attention du chien sur un stimulus. En revanche, le reniflement est un comportement cognitif explicite, demandant un effort. Le « cycle de reniflement » pourrait jouer un rôle dans le codage des odeurs. Dans différentes revues, les auteurs soulignent que le reniflement favorise l'entrée du stimulus olfactif, peut être ajusté en fonction des différentes concentrations d'odeurs, et modifie le schéma d'activité neuronale. En général, le reniflement est utilisé de manière continue pour analyser l'environnement, un seul reniflement étant suffisant pour distinguer des odeurs très similaires. On pense également qu'il aide à localiser les odeurs. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

En général, les résultats soutiennent l'idée que les chiens ne peuvent pas récupérer d'informations olfactives utiles sans renifler. Lors du reniflement, l'air est inhalé par les narines par de courtes aspirations, la bouche restant fermée (Craven *et al.*, 2010). Ainsi, l'air chargé de molécules odorantes est dirigé vers la cavité nasale, ce qui facilite leur transport vers les neurones récepteurs olfactifs. Le reniflement crée un flux d'air turbulent, réduisant la distance de diffusion de l'air frais vers les récepteurs. Bien qu'il y ait des discussions sur la possibilité pour les chiens de haleter et de renifler en même temps, il semble que le reniflement soit plus bénéfique pour la perception des odeurs que la respiration normale (Bräuer et Blasi, 2021). Les résultats de l'étude de Concha *et al.* démontrent que la durée de reniflement est significativement plus courte pour les vrais négatifs que pour d'autres catégories comme les vrais positifs, avec un seul épisode de reniflement observé pour les vrais négatifs, contre deux en moyenne pour les autres. Cela indique que les chiens détecteurs peuvent efficacement évaluer la présence d'une odeur cible par leur comportement de reniflement. (Concha *et al.*, 2014)

B. Une grande diversité d'utilisations de l'odorat canin par l'Homme

Voici quelques exemples de domaines où l'odorat du chien se met au service de l'Homme.

La Gendarmerie Nationale, grâce au Centre National d'Instruction Cynophile de la Gendarmerie (CNICG) que nous étudierons en détail dans la seconde partie, correspond au centre de formation de tous les chiens de recherche de la Gendarmerie Nationale en France. Ils peuvent intervenir dans le cadre de perquisitions, de contrôles ou d'opérations de sécurisation, avant un événement important par exemple. Il existe actuellement 9 spécialités de recherche : armes et munitions, billets de banque, explosifs, Recherche d'Explosifs sur Personnes en Mouvement (RExPeMo), produits accélérateurs d'incendie, produits stupéfiants, restes humains et Stupéfiants, Armes, Munitions et Billets de banque (SAMBi) auxquelles on peut ajouter les spécialités de pistes dont les victimes d'avalanche et ainsi que de garde ou d'assaut (GIGN). Ainsi, on compte environ 600 chiens formés présents en permanence sur l'ensemble du territoire. (Ministère de l'intérieur, 2024)

a. Détection de substances dangereuses

Un groupe majeur de chiens renifleurs dans le monde est celui des chiens spécialisés dans la détection d'explosifs. L'utilisation d'animaux entraînés est considérée comme une méthode fiable, polyvalente et économique pour localiser les explosifs. Ces animaux sont plus efficaces que les appareils spécialisés pour distinguer et identifier les odeurs cibles tout en ignorant les autres odeurs présentes dans l'environnement. On estime qu'il y a 100 millions de mines terrestres dans le monde, ce qui limite l'accès aux terres agricoles et représente un danger pour les personnes. Les chiens d'assistance sont formés pour localiser ces mines et permettent d'indiquer les zones sécurisées. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Lors de leur formation, les chiens apprennent à repérer l'odeur résiduelle des produits inflammables tout en négligeant d'autres odeurs, comme celles des matériaux brûlés. Ils sont également plus précis que les humains pour détecter les traces d'accélérateurs dans les débris, capable de suivre des concentrations extrêmement faibles, allant jusqu'à 0,005 µL, ce qui se compare au niveau de sensibilité des techniques de laboratoire (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021). Certaines unités, telles que les équipes cynotechniques de la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris, de la Gendarmerie Nationale, sont formées à ce type de recherche afin d'aider les enquêteurs lors d'un incendie d'origine potentiellement criminelle, afin de détecter des traces de produits accélérateurs d'incendie. De plus, des sociétés civiles voient le jour dans ce domaine, travaillant au profit d'assurances afin d'acquérir l'expertise de maîtres-chiens.

En outre, les chiens peuvent être entraînés à détecter des substances dangereuses, comme le toluène, même à de très faibles quantités et sur de longues distances. Cela améliore la sécurité en identifiant les zones contaminées sans exposer les humains à des niveaux élevés de toxines, facilitant ainsi un échantillonnage efficace des contaminants. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

b. Détection de substances illégales

Les agents des douanes et les contrôleurs aux frontières utilisent des chiens d'assistance spécialement entraînés pour détecter des drogues illégales telles que la cocaïne, l'héroïne, la méthamphétamine et la marijuana. Ces chiens sont régulièrement déployés pour contrôler des millions de personnes et de marchandises à travers les frontières internationales, notamment dans les aéroports, les ports maritimes et les centres de tri de courrier. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Dans ce domaine, la Gendarmerie Nationale reste l'entité qui réalise la formation de la majorité des chiens de recherche de substances illégales en France. Ils sont amenés à intervenir dans le cadre de perquisitions ou de contrôles dans des lieux publics par exemple.

c. Détection d'odeurs biologiques

Les chiens sont de plus en plus utilisés pour détecter des odeurs biologiques, comme celles des humains, leur permettant d'identifier une personne spécifique même en présence d'autres odeurs. Dans certains pays, la police exploite cette capacité pour associer les odeurs retrouvées sur une scène de crime à celles d'un suspect. Bien que cette méthode suscite des controverses quant à sa fiabilité, elle est considérée comme précieuse par certaines forces de l'ordre. Des études montrent que les chiens peuvent faire correspondre les odeurs de différentes parties du même corps humain ou suivre des traces d'odeur humaine dans des centres-villes très fréquentés jusqu'à 48 heures après leur émission, avec une précision moyenne de 77,5 %. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Les chiens peuvent également identifier des maladies ou des cancers (prostate, poumon, vessie, sein, mélanome) grâce à l'analyse des composés organiques volatils (COV) émis par le corps dans l'air expiré, l'urine, les selles en détectant des agents pathogènes même à de très faibles concentrations. Ils sont capables de distinguer des échantillons provenant de patients malades de ceux de personnes en bonne santé, incluant des détections liées à des cancers spécifiques et à des infections virales comme la COVID-19. Des études ont montré que les chiens peuvent atteindre une sensibilité diagnostique de 82,63 % et une spécificité de 96,35 % dans la détection du virus. Le taux de détection moyen global atteint par les chiens était de 94 % ($\pm 3,4$ %). (Grandjean *et al.*, 2020 ; Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

L'utilité du chien en tant que détecteur se retrouve durant les crises épileptiques, hypoglycémiques ou de narcolepsies. Il a donc été montré que le chien est capable de reconnaître des changements spécifiques dans l'odeur de la personne et avertir le propriétaire sur la base de changements subtils de comportement imperceptibles pour les humains. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Bien que l'utilisation des chiens pour détecter des maladies reste un sujet de débat, ces animaux pourraient apporter une aide précieuse dans la lutte contre les infections, en identifiant des signatures olfactives uniques associées à différents agents pathogènes et ainsi permettre une différenciation des agents pathogènes en fonction des composés organiques volatils qu'ils produisent. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

d. Détection d'organismes vivants

Les chiens jouent un rôle essentiel dans les missions de recherche et de sauvetage, aidant à retrouver des victimes lors d'urgences telles que des avalanches, tremblements de terre ou accidents d'avion.

Ils sont également utilisés pour prévenir la propagation d'espèces nuisibles, comme le serpent arboricole brun à Guam, avec un taux de détection de 62 %. En agriculture, ces animaux détectent des parasites, comme le charançon du palmier, crucial pour la culture des dattes au Moyen-Orient. Aux États-Unis, les chiens atteignent une précision de 95 % dans la détection des termites, permettant de prévenir des dégâts avant qu'ils ne soient visibles. Ils sont également efficaces pour repérer des maladies dans des échantillons biologiques, comme des cyanobactéries dans des fermes de poissons-chats.

Les chiens sont formés pour détecter des excréments d'animaux en danger, comme le renard de San Joaquin, où ils affichent une précision de 100 %, surpassant largement les humains. Ils aident aussi à surveiller les tigres et à gérer les populations d'ours, montrant ainsi leur polyvalence dans la conservation et la gestion des espèces. Leurs capacités s'étendent même à la détection de micro-organismes, rendant leur utilisation dans divers domaines pratiquement illimitée. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

En conclusion de cette première partie, l'odorat du chien, extrêmement développé et finement organisé, est un sens complexe qui repose sur une anatomie et une physiologie spécifiques à chaque individu. Le système olfactif du chien dans son intégralité lui permet d'interpréter une grande variété de stimuli odorants. Ces capacités permettent aux chiens de détecter des odeurs à des seuils extrêmement bas, mais aussi de les reconnaître rapidement et de s'adapter à des environnements olfactifs complexes. Ce sens unique est non seulement vital pour la survie et l'interaction du chien avec son environnement, mais il est également mis à contribution dans une variété d'applications

humaines, allant de la détection de substances dangereuses ou illégales à la recherche de personnes disparues ou d'odeurs biologiques spécifiques.

Ainsi, l'odorat du chien est un outil indispensable au service de l'homme, un véritable prolongement de nos propres sens, et reste un domaine fascinant de la science vétérinaire avec de nombreuses applications pratiques. L'une de ces applications concerne la recherche de restes humains que nous allons étudier dans cette seconde partie à travers l'exemple de la seule équipe Française formée à ce type de recherche, le Groupe Nationale d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie (GNICG).

Deuxième partie : L'importance des chiens de recherche de restes humains

Les chiens, en raison de leur système olfactif exceptionnel, de leur coopération avec les humains et de leur capacité à suivre des ordres, sont utilisés dans divers domaines, notamment la recherche médico-légale. Depuis le 19^e siècle, ils jouent un rôle crucial en tant qu'outils de détection, et les chiens de recherche de restes humains (RRH) sont devenus une méthode clé depuis les années 1970 (Greibenkemper *et al.*, 2021). Ces chiens sont capables de détecter des quantités minimales d'odeurs de décomposition humaine et se distinguent par leur sensibilité et leur sélectivité.

Par exemple, des études ont montré que les chiens RRH peuvent identifier des échantillons de sol de tombes avec une précision allant jusqu'à 99,8 % et détecter des résidus de décomposition sur divers matériaux avec une grande précision (Alexander *et al.*, 2015). Certains chiens détecteurs de cadavres sont capables de retrouver des traces humaines, comme des os, des fluides corporels et des tissus, à la fois en surface, sous terre ou dans l'eau. Ces chiens démontrent une efficacité de détection variant entre 30 % et 81% lors d'essais sur le terrain. Ils permettent ainsi au secours et aux forces de l'ordre de couvrir rapidement de vastes zones, ce qui permet aux services d'urgence et aux forces de l'ordre d'économiser du temps et des efforts. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

La formation est essentielle et repose sur des méthodes variées, utilisant des matériaux de décomposition, frais, putréfiés et squelettisés, ou artificiels pour enseigner aux chiens à détecter des cibles spécifiques (DeGreeff et Furton, 2011). Malgré leur potentiel, il existe des défis, notamment l'accès aux aides à la formation et les différences dans les molécules produits par les restes humains et animaux. Bien que des méthodes artificielles aient été développées, elles ne reproduisent pas toujours fidèlement les odeurs de décomposition (Cieśla *et al.*, 2023). Nous analyserons une partie de ces matériaux utilisés et les alternatives actuellement disponibles sur le marché.

Jusqu'à récemment, les chiens étaient les principaux acteurs dans le domaine de la détection, mais des avancées récentes en technologie analytique ont été mises en œuvre pour jouer des rôles similaires. Bien que ces technologies améliorent l'entraînement et l'efficacité des chiens détecteurs, le consensus actuel reste que ces derniers offrent les meilleures normes de détection. (Hayes *et al.*, 2018)

L'identité est considérée comme un droit fondamental de l'homme et aucun individu ne devrait perdre cette identité après sa mort. Les chiens sont des outils de détection précieux pour la récupération des restes humains en vue d'une identification ultérieure et pour permettre la restitution des restes des victimes à leurs familles.

En France, une seule équipe cynotechnique est formée dans ce domaine. Il s'agit d'une équipe de la Gendarmerie Nationale, le Groupe Nationale d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie (GNICG).

Cette partie vise donc à explorer et développer les différentes techniques de formation des chiens dans le contexte de recherche de restes humains (RRH), en prenant en compte les limites et l'aspect juridique, à travers des études de cas et des recherches scientifiques actuellement menées dans le monde entier sur l'odeur des restes humains en décomposition.

1. Le Groupe National d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie (GNICG)

L'objectif principal de toute équipe canine de recherche de restes humains (RRH) est de localiser une personne disparue suspectée décédée de causes naturelles ou « non naturelles ».

Il s'agit donc de la mission principale du Groupe Nationale d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie (GNICG). Ce groupe, dépendant de la Gendarmerie Nationale est situé dans le Centre National d'Instruction Cynophile de la Gendarmerie de Gramat (CNICG) dans le Lot.

A. Présentation générale du Centre National d'Instruction Cynophile de la Gendarmerie de Gramat (CNICG)

Le Centre national d'instruction cynophile de la gendarmerie (CNICG), créé en 1945 à Gramat, a pour mission de recruter, entraîner et suivre sur le plan médical l'ensemble des chiens en formation destinés à des missions spécifiques de la Gendarmerie. Il s'agit de l'unique centre de formations cynotechniques de la Gendarmerie Nationale en France. De plus, ce centre est chargé d'assurer entre autres la formation des futurs maîtres et instructeurs. Il assure également une veille technique, exploite les retours d'expérience du terrain et recherche de nouvelles techniques qui relève de la cynotechnie. Le centre propose 17 spécialités réparties en trois grandes catégories : la recherche de personnes (piste), la détection de matières (comme les stupéfiants, explosifs, armes) et le mordant (défense et interventions). Le bien-être animal est une priorité, avec la présence de deux vétérinaires ainsi que d'une clinique équipée sur place afin de pouvoir intervenir directement en cas d'accident, de réaliser les radiographies type dysplasie ou bien de gérer la médecine préventive de l'ensemble des chiens présents sur le centre. Le CNICG est reconnu pour son expertise à l'échelle nationale. Le centre accueille entre 300 et 350 stagiaires par an, dont 3 stages de formation initial de 14 semaines. Enfin, le CNICG est implanté sur 2 sites sur une superficie de 14 hectares. Il dispose de 9 chenils accueillant 137 chiens, d'une clinique vétérinaire, de 4 rings et de deux laboratoires (Ministère de l'intérieur, 2024). Depuis sa création en 1945, le CNICG a formé plus de 4500 chiens et maîtres-chiens. Il assure le remplacement annuel des chiens décédés ou devenus inaptes. On retrouve aujourd'hui environ 500 équipes cynophiles sur le territoire national. (Courtin, 2009)

Enfin, le CNICG dispose d'une unité spécialisée, le Groupe National d'Investigation Cynophiles de la Gendarmerie (GNICG), qui intervient sur des missions telles que la recherche de restes humains. Il s'agit de l'unique unité française formée à ce type de recherche sur l'ensemble du territoire.

B. Présentation générale du Groupe national d'investigation cynophiles de la Gendarmerie (GNICG)

Le GNICG, fondé en 2002, est ainsi l'unique unité française formée à la recherche de restes humains (RRH). Leur mission principale est d'appuyer les unités de terrain dans le cadre d'enquête criminelles ou de disparitions inquiétantes de personnes comme dans des cas de suicides ou de maladies telles que Alzheimer. Ponctuellement, ils peuvent intervenir dans des cas de gestion de crises comme lors du crash de l'avion Airbus de la Germanwings en 2017 ou lors d'un tsunami en Asie en 2003.

Leur mission est donc de rechercher des corps ou des parties de corps dans le cadre de ces enquêtes. Ils sont amenés à être engagés dans toute la France ainsi que dans les DOM/TOM, avec une nouvelle mission pratiquement chaque semaine de l'année.

Ce sont régulièrement des missions au profit de sections de recherches. Les plus connues et récentes sont par exemple l'affaire Maëlys, la disparition de Lina Delsarte ou bien celle du petit Émile. Ils peuvent être sollicités par les magistrats pour qu'au fur et à mesure des déclarations des suspects le corps puisse être retrouvé.

2. Formation à la recherche de restes humains

Un chien de détection opérationnel est le résultat de plusieurs facteurs : (Clément, 2022)

- Sélectionner un chiot prometteur,
- Mener une formation efficace,
- Évaluer en permanence les performances de travail du chien.

En tant que tels, les chiens de détection efficaces ont été définis comme des animaux confiants, faisant peu d'erreurs, alertant de la présence d'odeurs cibles aussi proches que possible, capables de filtrer stratégiquement la zone de recherche de manière efficace, indépendants et peu distraits.(Clément, 2022)

Deux méthodes principales de recherche peuvent être distinguées : la première consiste à suivre une piste olfactive au sol, en gardant le nez proche du sol, appelée pistage et la seconde à suivre des molécules d'odeurs en suspension dans l'air, le nez levé, appelée questage. Les chiens peuvent alterner entre ces deux méthodes en fonction des conditions météorologiques, de l'environnement, de l'odeur recherchée, et de leur entraînement (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021). La détection dans l'air présente l'avantage de permettre de couvrir rapidement une plus grande surface et de localiser les cibles plus efficacement grâce aux courants d'air (Jones *et al.*, 2004). En France, les chiens du GNICG sont formés au questage et le maître-chien les guide sur un secteur prédéterminé en amont avec l'équipe enquêtrice.

A. Formation des chiens

a. Quelques éléments de la littérature

Différentes recherches ont été effectuées afin d'évaluer l'entraînement des chiens spécialisés dans la recherche de restes humains (RRH) et chercher les conditions optimales permettant de maximiser leur efficacité. Par exemple, il a pu être montré que les meilleures conditions environnementales pour la détection de restes humains seraient une humidité de 20 % ou plus, des vitesses de vent supérieures à 8 km/h et des températures entre 4 et 16 °C. (Ferry *et al.*, 2019)

Une enquête menée dans plusieurs pays a montré que les pratiques de formation et les procédures de détection varient, notamment en ce qui concerne le niveau de cécité des tests et le nombre de chiens utilisés. Toutefois, il existe des similitudes dans l'utilisation de tests de contrôle, la collecte d'odeurs de leurres et les conditions environnementales idéales pour la détection. Les méthodes et le matériel de formation des chiens RRH varient d'un pays à l'autre, et il n'existe pas de normes ou de certifications internationales standardisées pour cette formation. Aux États-Unis, l'Organisation

of Scientific Area Committees (OSAC), via le sous-comité Dogs and Sensor (anciennement Scientific Working Group for Dogs and Orthogonal Detectors, SWGDOG), propose une liste de matériels de formation. Au Royaume-Uni, il existe un manuel d'orientation, mais sans liste spécifique de matériel à utiliser. En Ontario, Canada, la Police provinciale de l'Ontario (OPP) a développé ses propres normes basées sur celles de l'OSAC, adaptées aux exigences canadiennes. (DeGreeff et Schultz, 2022)

Les résultats actuels montrent que les chiens peuvent facilement maîtriser au moins dix discriminations olfactives et ont également tendance à apprendre des odeurs supplémentaires avec une facilité croissante (Williams et Johnston, 2002). Il a pu être prouvé que les chiens RRH doivent être formés avec des restes humains à différents stades de décomposition et dans diverses conditions environnementales pour s'adapter aux variations dans les composés organiques volatils (COV) émis lors de la décomposition (Forbes *et al.*, 2014), mais nous y reviendront dans notre dernière partie.

Les techniques d'entraînement influencent aussi directement l'olfaction. Les chiens développent plus de récepteurs olfactifs pour les odorants sur lesquels ils sont régulièrement entraînés (Youngentob et Kent, 1995). De plus, l'exposition à des odeurs stimule le renouvellement des cellules olfactives (Wilson et Stevenson, 2003). L'enrichissement olfactif influence la capacité à identifier les composants d'un mélange. Les capacités de discrimination olfactive des rats par exemple sont améliorées grâce à l'enrichissement olfactif et le système olfactif traite les mélanges de manière synthétique avant l'enrichissement et de façon élémentaire après. (Mandairon *et al.*, 2006)

Il existe encore de très nombreuses lacunes dans la compréhension de la manière dont les chiens perçoivent et distinguent les odeurs, en particulier dans les mélanges complexes. Par exemple, on ne sait pas si les chiens recherchent la signature olfactive complète d'une substance cible ou si seuls certains composants servent d'odeur cible (Johnen *et al.*, 2017). Bien qu'ils soient capables de détecter des odeurs spécifiques, leur comportement face aux mélanges n'est pas toujours prévisible et il est presque impossible de prédire quels composants d'une odeur un chien particulier utilise pour identifier la cible. La formation sur les mélanges d'odeurs semble plus efficace que celle sur des odeurs pures (Hall et Wynne, 2018), suggérant que les chiens peuvent percevoir un mélange comme une nouvelle odeur plutôt que comme la somme de ses composants (Hayes *et al.*, 2018), d'autres études ont montré que les chiens apprennent plus rapidement les odeurs complexes lorsqu'ils sont d'abord entraînés sur les composants individuels de l'odeur (Fischer-Tenhagen *et al.*, 2017), tandis que *Dorman et al* ont démontré dans leur étude que leurs chiens n'ont pas été en mesure de former une catégorie, à partir de molécules liées au nitrate d'ammonium, leur permettant d'identifier un nouveau mélange de nitrate d'ammonium (Dorman *et al.*, 2021). Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre comment les chiens reconnaissent les odeurs associées à la décomposition et pour établir des protocoles de formation adaptés. (Prichard *et al.*, 2020)

Une autre étude souligne l'importance de la méthode d'entraînement, en révélant que les chiens ne détectent pas instinctivement une odeur cible dans un mélange après un entraînement exclusivement basé sur cette odeur. La performance olfactive des chiens dépend également de leur formation olfactive passée. (Dorman *et al.*, 2021)

Il est également crucial de prendre en compte les différences individuelles dans la motivation des chiens, car un manque d'enthousiasme pour apprendre ou accomplir une tâche peut nuire aux résultats. Pour optimiser la performance, il est essentiel de choisir une récompense adéquate, en

s'assurant que le chien est familier avec celle-ci ou en effectuant un test de préférence avant l'entraînement. (Brucks *et al.*, 2017)

b. En pratique

Voici quelques informations concernant les méthodes d'apprentissage à la recherche de tout type de matière.

De manière générale, l'entraînement doit être basé sur des renforcements positifs. Le type de conditionnement utilisé est donc un conditionnement Pavlovien (Figure 18). Il permet d'améliorer l'acquisition des odeurs et la résistance aux perturbateurs (Jenkins *et al.*, 2018).

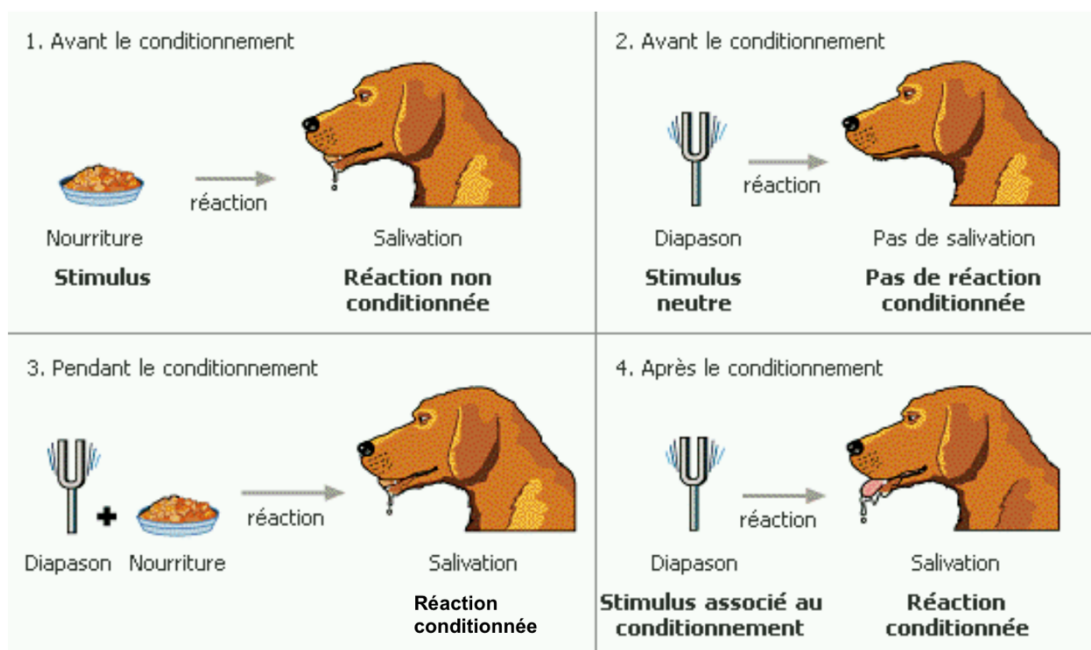


Figure 18 : Schéma du conditionnement Pavlovien (d'après Psychanalyse, 2024)

Dès l'arrivée du chiot à la maison, il faut prévoir quelques semaines pour qu'il s'acclimate avant de commencer la formation de base, vers l'âge de 8 à 10 semaines. L'entraînement consiste à apprendre au chiot à utiliser ses sens, principalement l'odorat, pour retrouver des personnes à travers des jeux comme le cache-cache. Le travail se fait tout d'abord à vu, c'est-à-dire que le chiot voit la cible partir et se cacher. Son but est donc de retrouver la cible où une récompense sous forme de jeu l'attendra. Il est également important de diversifier les expériences du chien en introduisant différentes molécules odorantes, terrains et distractions, tout en le socialisant avec des humains et des animaux. Le chiot doit également avoir du temps pour jouer et rester un simple chiot. Un entraînement type agilité peut être commencé, en montant sur les rochers, les bancs ou en marchant dans de hautes herbes. La formation formelle à l'obéissance ne débute pas avant l'âge de six mois. Si une équipe novice s'entraîne 20 à 30 heures par semaine, elle peut devenir qualifiée en environ deux ans. La récompense, qui peut être un jouet ou un jeu, doit être spéciale et ne doit être utilisée que lors des séances d'entraînement. L'objectif final serait que le chien montre une volonté de désobéir quand il sait avoir raison : c'est ce qu'on appelle la « désobéissance intelligente » qui est permise grâce à la confiance en soi du chien. (Fenton, 1992)

L'entraînement physique et la condition physique jouent un rôle clé dans les performances olfactives des chiens de détection. Après un exercice, les chiens halètent davantage, ce qui réduit leur capacité à détecter les odeurs. Les chiens physiquement conditionnés conservent une meilleure acuité olfactive que ceux qui ne sont pas entraînés. Par exemple, les chiens non conditionnés ont vu leur sensibilité olfactive diminuer de 63,6 % après un exercice (Angle *et al.*, 2014). En revanche, les chiens conditionnés, grâce à une meilleure condition cardiovasculaire, halètent moins et maintiennent ainsi de meilleures performances olfactives.

Lors de l'entraînement, les chiens recherchent des cibles dans des zones définies qui peuvent être soit « aveugles » (où le maître ne connaît pas l'emplacement ou le nombre de cibles), soit « connues » (où le maître connaît ces informations). Les chiens sont formés à fournir un signal clair lorsqu'ils trouvent des restes, qui peut être soit passive (s'asseoir ou se coucher) soit active (gratter ou aboyer). (Forbes *et al.*, 2014)

Dans certaines régions, comme au Canada, le recours à des chiens de recherche et de sauvetage est souvent le premier recours en cas de disparition de personnes, qu'elles soient suspectes ou non. Ces recherches humaines peuvent se poursuivre pendant des semaines ou des mois après le déploiement initial, lorsque la cible n'est pas considérée comme vivante. En plus de l'utilisation de chiens de recherche humains, des chiens de service général sont souvent utilisés bien après le passage de l'odeur vivante à l'odeur décédée. Dans de nombreux cas, l'équipe chien et maître de recherche de victimes humaines est souvent appelée beaucoup plus tard, lorsque les autres outils de recherche ont été épuisés. Bien que cela soit de nature anecdotique, des recherches plus approfondies doivent être partagées avec les organisations sur l'importance de déployer des chiens de recherche de victimes humaines tôt, et sur le fait que les chiens de service général n'ont pas été formés à la spécialité de la décomposition des odeurs humaines (DeGreeff et Schultz, 2022).

D'après une étude de Martin Clément dans laquelle une cinquantaine de maîtres-chiens spécialisés dans la RRH ont été interrogés, plusieurs éléments ont été mis en évidence (Clément, 2022) :

- La plupart des maîtres-chiens interrogés ont déclaré recourir au renforcement plutôt qu'à la punition. Une minorité d'entre eux mentionne cependant encore la pratique des punitions. Lorsqu'ils le font, ils ne donnent pas la récompense à leur chien (punition négative). (Figure 19)
- Parmi les maîtres-chiens pratiquant le renforcement positif, ils ont déclaré utiliser des jouets, un clicker, de la nourriture ou des encouragements comme stimuli positifs. La plupart d'entre eux utilisent une combinaison des différentes récompenses. (Figure 19)

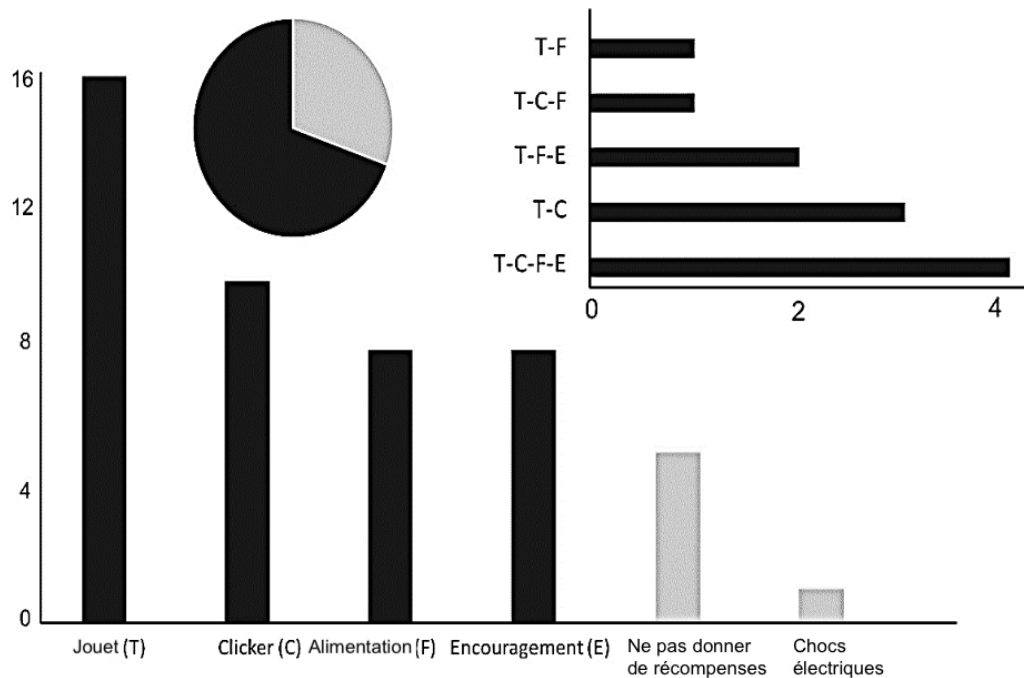


Figure 19 : Types de conditionnement utilisés par les maîtres interrogés pour entraîner leurs chiens détecteurs de restes humains (d'après Clément, 2022)

Le diagramme à secteurs représentant la proportion de techniques de renforcement et de punition utilisées (gris clair : punition, gris foncé : renforcement)

Pour les chiens du GNICG, les entraînements débutent par le départ sur des zones d'entraînement (bâtiment ou extérieurs) où des tubes d'entraînement (Figure 20) sont disposés pour effectuer des mises en situation. Différents types de secteurs et de mises en situations sont utilisés afin d'habituer les chiens à travailler dans tout type de zone et de les familiariser avec tout type d'odeurs.



Figure 20: Type de jouet utilisé au GNICG avec les chiens afin de les récompenser. Dans ce cas, le chien se récompense lui-même en trouvant le jouet caché (photographie personnelle)

B. Rôles du maître-chien

Le maître-chien a de multiples rôles : construire la relation en binôme avec son chien incluant leur formation personnelle mais aussi l'apprentissage du travail en binôme, avoir le recul et les connaissances nécessaires pour déterminer quel type d'approche est le plus intéressant durant une enquête en fonction de l'environnement et du contexte, et enfin savoir s'appuyer sur de nouvelles technologies pour diriger au mieux son chien durant une recherche.

a. En binôme avec le chien

Pour un maître-chien, il est essentiel d'adapter le programme d'entraînement en fonction du chien, de faire preuve de patience, d'admettre ses erreurs, et d'essayer de nouvelles méthodes. (Fenton, 1992)

Pour les maîtres-chiens de RRH, une formation complète est essentielle, mais elle manque de normalisation à l'échelle internationale. Les maîtres-chiens doivent comprendre les processus de décomposition humaine et savoir comment les différents environnements influencent la détection des odeurs, ce qui impacte les stratégies de recherche. Au Royaume-Uni par exemple, les maîtres-chiens peuvent participer à des formations sur la décomposition et la chimie des odeurs, et obtenir des conseils auprès de scientifiques via la National Crime Agency pour mieux comprendre l'effet de l'environnement sur la disponibilité des odeurs. Les chiens doivent idéalement être certifiés pour différentes missions, car les compétences nécessaires varient selon les scénarios en zones rurales ou urbaines par exemple. (DeGreeff et Schultz, 2022)

Le rôle du maître dans le processus de détection est essentiel, notamment en ce qui concerne le taux de récompenses positives données au chien et sa capacité d'interprétation des signaux. La motivation du chien peut diminuer si les objectifs semblent inaccessibles. En effet, les chiens peuvent chercher des moyens plus simples d'obtenir des récompenses, comme deviner ou désigner des cibles au hasard. Par conséquent, un entraînement continu et une évaluation régulière de la précision des détections sont nécessaires pour maintenir les compétences olfactives des chiens (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021). La réussite des détections d'odeurs dépend largement de la capacité du maître à interpréter les signaux comportementaux de l'animal, qu'ils soient spontanés ou appris (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021). Le maître a donc le rôle crucial d'observateur afin de comprendre au mieux les attitudes et les comportements de ce chien.

Certaines études ont montré que, lors de la recherche de cadavres, 10 % des alertes des chiens n'étaient pas reconnues par leurs maîtres, et 5 % des détections positives provenaient de l'intervention des maîtres eux-mêmes. L'objectif de l'étude de Lit *et al.* était d'évaluer comment les croyances des maîtres-chiens influencent les performances des chiens dans un contexte pratique. L'analyse a montré que la conviction des maîtres que l'odeur était présente renforçait leur capacité à interpréter les alertes des chiens, soulignant que l'influence humaine est plus déterminante que celle des chiens dans la détection. (Lit *et al.*, 2011)

Parallèlement, une autre étude a examiné comment les odeurs humaines, notamment celles associées au stress, peuvent affecter la cognition des chiens. En utilisant une tâche de biais cognitif, les chercheurs ont observé que les chiens étaient moins enclins à s'approcher d'un bol de nourriture lorsqu'ils étaient exposés à une odeur de stress, par rapport à l'absence d'odeur. Cela suggère que les chiens pourraient adopter des comportements de réduction des risques en réponse aux signaux olfactifs de stress humain. Cette étude de Parr-Cortes *et al.* est la première à démontrer que les

signaux olfactifs, sans indices visuels ou auditifs, peuvent influencer la cognition et l'apprentissage des chiens, ce qui pourrait avoir des implications significatives pour leur bien-être et leurs performances au travail. (Parr-Cortes *et al.*, 2024 ; Wilson *et al.*, 2007)

b. Dans un contexte et un environnement

Le maître-chien a un rôle majeur d'observateur durant les recherches. Une fois la zone de recherche définie, les maîtres-chiens spécialisés dans la recherche de restes humains (RRH) observent l'environnement à la recherche de perturbations indiquant la présence potentielle d'une tombe clandestine par exemple. On peut citer des variations dans le sol, comme des tas de terre résultant du creusement d'une tombe ; l'absence initiale de végétation après le creusement, suivie d'une croissance végétale plus dense due à l'enrichissement en nutriments provenant d'une tombe ; des marques d'outils sur le sol, comme des traces de pelles ; des signes d'activité animale, comme des fouilles ou des excréments ; des objets déplacés qui semblent anormaux dans le paysage. (DeGreeff et Schultz, 2022)

Une fois qu'un périmètre est délimité, les chiens de détection sont guidés par le maître-chien sur la zone afin qu'il parcoure chaque espace à la recherche de molécules odorantes (DeGreeff et Schultz, 2022). Dans certaines situations de doute, une sonde peut être utilisée pour améliorer la détection en permettant la libération de composés organiques volatils (COV) du sol et ainsi permettre au chien d'avoir un meilleur accès aux molécules odorantes, mais cette méthode est invasive et peut endommager un cadavre (Forbes *et al.*, 2014). Le maître-chien est donc celui qui s'assure que son chien a ratissé olfactivement toute la zone concernée.

Enfin, comprendre les comportements des personnes disparues est crucial lors de la recherche. Les enfants, par exemple, peuvent être facilement distraits, tandis que les patients atteints d'Alzheimer sont plus enclins à se perdre. Il est important de se demander si la personne a déjà eu des épisodes de perte de mémoire, où elle pourrait être allée, et si elle est préparée à faire face aux conditions environnementales. Pour mieux planifier un déploiement, plusieurs ressources fournissent des informations sur les comportements des personnes disparues comme des sites d'organisations comme la Alzheimer's Foundation of America. (Stejskal, 2012)

c. Avec l'appui de nouvelles technologies

Ce chapitre vise à donner un aperçu des ressources disponibles pour aider les maîtres-chiens à déployer leurs chiens de manière efficace lors de recherches.

Voici quelques exemples de ressources utiles pour les maîtres-chiens avant une mission, en supposant que le corps recherché se trouve à l'extérieur. Les maîtres-chiens ont besoin d'un plan qui inclut le lieu de recherche et les conditions météorologiques. Cela concerne tant les terrains terrestres que les zones aquatiques, ainsi que l'évolution des conditions depuis la disparition du défunt. Concernant l'emplacement, on peut donc citer l'utilisation de cartes avec les topographies, le type de terrain incluant la végétation, l'hydrologie et le type de sol. De plus, les conditions météorologiques passées et présentes incluant la température, les précipitations, le vent sont extrêmement importantes (DeGreeff et Schultz, 2022). Nous verrons plus en détail dans les quatrième et cinquième parties en quoi ces conditions influent les recherches.

- Cartes et des technologies de cartographie dans les recherches terrestres et maritimes (Stejskal, 2012)

Les cartes et systèmes de positionnement comme le GPS, les systèmes d'information géographique (SIG), la latitude et la longitude se révèlent très utiles pour se repérer à l'extérieur, planifier des interventions ou pour de l'analyse criminelle.

Les maîtres-chiens ont besoin de plus qu'une simple carte routière pour planifier leurs missions. Pour comprendre la topographie d'une zone, Internet offre de précieuses ressources, avec Google Earth ou Google Maps par exemple. Cela permet ainsi aux maîtres-chiens d'évaluer le terrain, d'identifier les bâtiments, les arbres et les rues, le tout depuis chez eux. Avec l'essor des appareils comme les iPads et les smartphones, l'accès à ces informations devient de plus en plus simple.

- Cartes topographiques (Stejskal, 2012)

Les cartes topographiques sont conçues pour illustrer les variations d'altitude dans des zones géographiques spécifiques, à l'aide de courbes de niveau. Ces lignes indiquant la forme et l'altitude du terrain : plus elles sont rapprochées, plus la variation d'altitude est importante. Elles représentent à la fois des caractéristiques naturelles (collines, vallées, rivières) et artificielles (routes, bâtiments).

La quantité de détails sur une carte dépend de son échelle. Pour une compréhension approfondie de la configuration du terrain, il est essentiel de consulter des cartes topographiques.

Les cartes peuvent être obtenues sur les sites Web des municipalités, auprès des services d'incendie locaux, des évaluateurs fiscaux ou dans des livres de plan du comté. Il est parfois utile de consulter des cartes anciennes, car le terrain évolue avec le temps. Plusieurs applications de cartographie topographique existent, certaines gratuites et d'autres payantes.

- Cartes hydrologiques (Stejskal, 2012)

Les cartes hydrologiques sont particulièrement utiles pour planifier des interventions en cas de noyade dans les rivières ou lacs. Google Maps peut fournir un aperçu de la configuration des plans d'eau, tandis que des cartes plus détaillées peuvent être trouvées dans des guides de pêche ou via des applications mobiles. Ces cartes montrent les entrées et sorties d'eau, les zones de navigation et des informations sur l'écoulement de l'eau, qu'il soit de surface ou souterrain.

Des données en temps réel sur les débits et les niveaux d'eau sont cruciales pour comprendre comment les odeurs se dispersent. La National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) offre des informations en temps réel sur les zones côtières et les Grands Lacs par exemple.

- Cartes des sols (Stejskal, 2012)

Le type de sol dans une zone de recherche joue un rôle crucial dans la décomposition, ce qui rend essentiel de connaître la nature du sol local. Par exemple, aux États-Unis, la majorité des sols ont été cartographiés. Le Web Soil Survey est l'une des principales ressources fournissant des cartes des sols, gérée par le Natural Resources Conservation Service (NRCS) du ministère américain de l'Agriculture (USDA). En complément, Google Earth propose également des cartes des sols via le site gelib.com. Pour les utilisateurs de smartphones, l'application SoilWeb pour iPhone est disponible. Connaître le type de sol peut influencer la dispersion des odeurs et, par conséquent, la stratégie de déploiement lors de la recherche d'une personne décédée.

- Historique de données météorologiques (Stejskal, 2012)

Il existe de nombreux sites Web pour accéder aux données météorologiques passées et actuelles. Il est essentiel de connaître les conditions météorologiques auxquelles le défunt a pu être exposé,

car cela aide à évaluer les changements taphonomiques et, en particulier, le rôle de la température dans la décomposition. Il est également essentiel de surveiller les tendances de précipitations, car des pluies importantes peuvent influencer la dispersion des odeurs dans le sol ou le ruissellement, impactant ainsi le déploiement d'un détecteur de chien.

- Météo actuelle et prévue

Les maîtres-chiens doivent prêter attention à la température, au vent, à la pression barométrique et aux précipitations présentes et à venir. Souvent, ils peuvent retarder le déploiement pour attendre des conditions plus favorables, qui incluent des températures modérées, une humidité et des vents légers.

Une aide importante lors d'intervention des chiens du GNICG est l'appui d'autres équipes de la Gendarmerie Nationale. On peut par exemple citer l'aide d'équipes formées à l'utilisation de drones ou bien l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (IRCGN), composée d'experts dont de nombreux anthropologues avec lesquels travail le GNICG de manière étroite. (Ducrettet *et al.*, 2013)

3. Alternatives et aides à la formation

Bien que l'utilisation de chiens pour détecter des restes humains soit prometteuse, plusieurs défis persistent. Le principal obstacle est l'accès limité aux aides à la formation. Les sources d'odeurs naturelles, comme les tissus humains obtenus lors d'autopsies ou le sol d'une scène de crime, sont souvent difficiles à se procurer à cause de la législation et peuvent poser des risques biologiques pour le chien et son maître (Stadler *et al.*, 2012).

Les aides à la formation pour les chiens détecteurs de cadavres sont des substances chimiques ou naturelles utilisées pour leur enseigner à reconnaître les odeurs de décomposition (Dargan et Forbes, 2021). Les versions chimiques ou artificielles, disponibles dans le commerce, imitent ces odeurs, mais des recherches (Stadler *et al.*, 2012 ; Tipple *et al.*, 2014) ont montré qu'elles ne sont pas optimales pour cet usage. Les aides naturelles incluent des tissus issus de restes animaux ou humains en décomposition, ainsi que des matériaux comme du textile ou de la terre ayant été en contact avec des restes (Dargan et Forbes, 2021). Cependant, il n'existe pas de normes internationales pour encadrer ces pratiques, et le choix des matériaux dépend souvent des ressources éthiquement disponibles. Cela entraîne une diversité des aides utilisées, dont l'odeur ne reflète pas toujours fidèlement celle de la décomposition humaine.

L'étude de Martin Clément a mis en évidence cette disparité d'aides à la formation utilisées par les équipes formées à la recherche de restes humains à l'échelle mondiale (Figure 21)

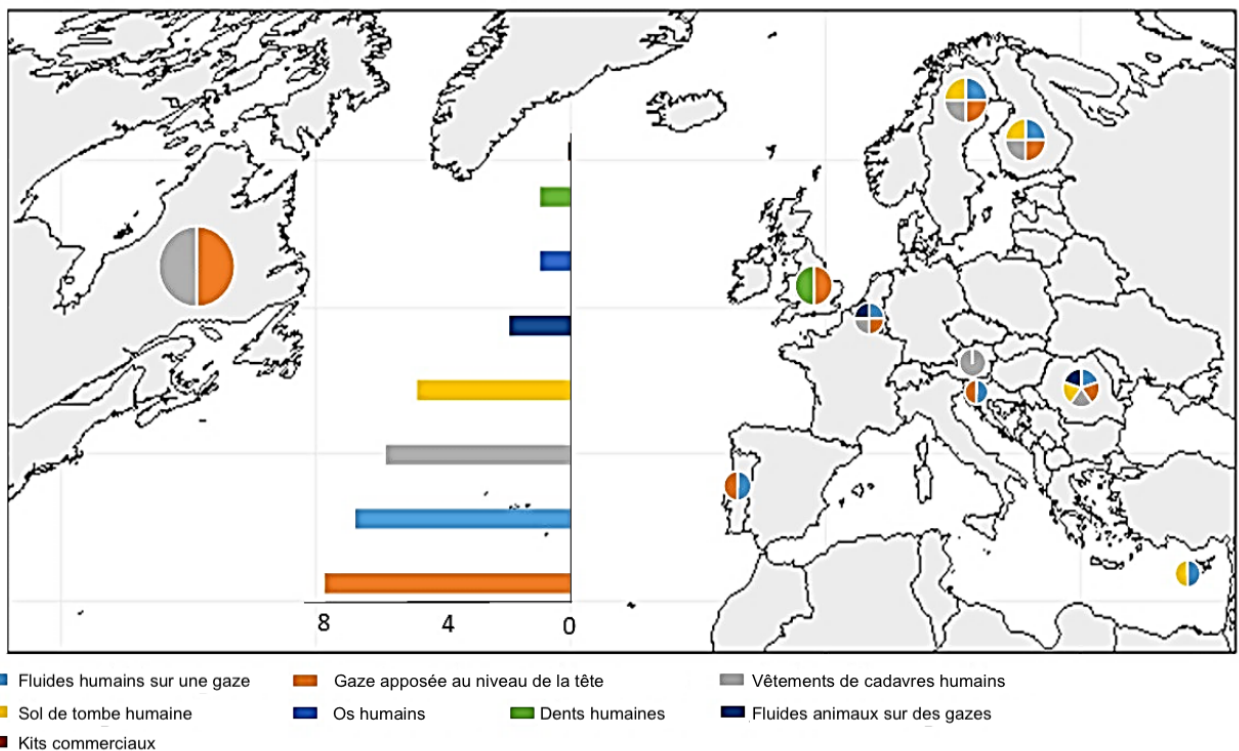


Figure 21 : Types d'outils de formation utilisés par les brigades de chiens de détection de restes humains étudiées pour entraîner leurs chiens (d'après Clément, 2022)

Les couleurs dans les diagrammes à secteurs représentent la diversité des outils de formation utilisés par les équipes dans le pays où se trouve le diagramme. Le diagramme à barres représente le nombre d'équipes de chiens de détection de restes humains (axe des ordonnées) qui utilisent les différents outils de formation.

Nous étudierons donc dans cette partie les différents types d'alternatives utilisées (Figure 22) ainsi que les aides à la formation développées et commercialisées en prenant l'exemple des tubes Getxent.

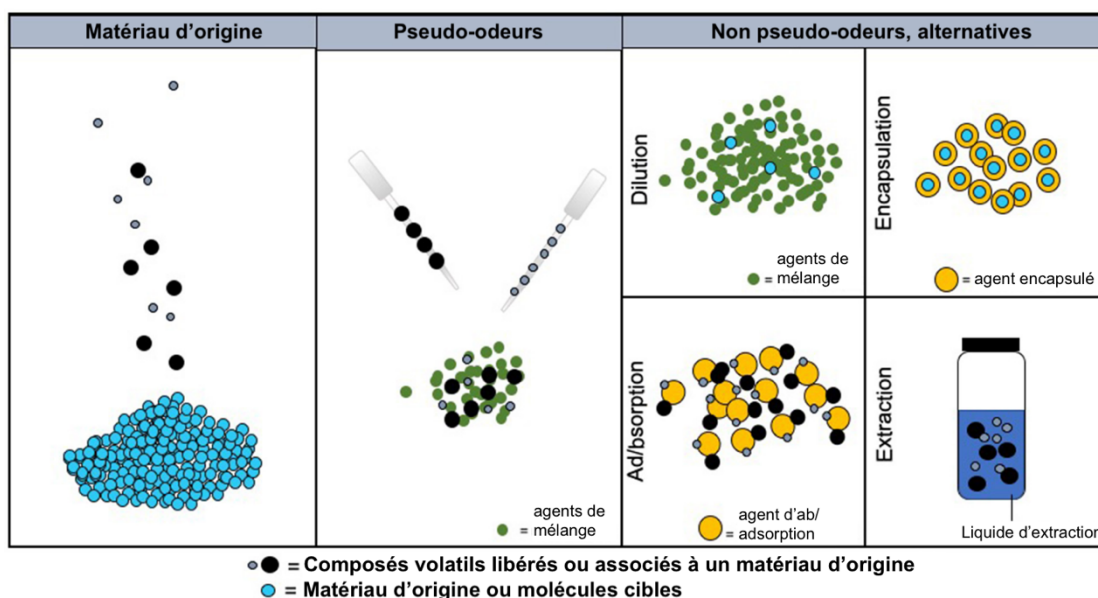


Figure 22 : Représentation visuelle montrant les différences chimiques et de fabrication entre le matériau d'origine, les pseudo-odeurs et les alternatives (d'après Simon *et al.*, 2020)

A. Alternatives à l'utilisation de cadavres

- Exemple de « nez artificiels » :

Les nez électroniques et l'électrophorèse capillaire sont étudiés dans l'analyse de composés odorants. Les nez électroniques, bien qu'ils puissent compléter les chiens dans certains contextes, ont des limitations, notamment en termes de nombre d'odorants détectés et de sensibilité aux facteurs environnementaux. L'électrophorèse capillaire offre une analyse rapide et un potentiel de portabilité, mais sa sensibilité par rapport aux chiens n'a pas encore été bien étudiée. (Hayes *et al.*, 2018)

- Exemple du porc :

L'utilisation de cadavres humains pour analyser les composés organiques volatils (COV) pose des défis éthiques, logistiques et juridiques. Une alternative consiste à utiliser des carcasses de porcs, qui partagent de nombreuses similarités anatomiques et biologiques avec les humains, comme le poids, la composition corporelle et les processus de décomposition (Matuszewski *et al.*, 2020 ; Titus *et al.*, 2022). Des études actuelles utilisent souvent des porcs pour aider à former des chiens de détection et pour mieux comprendre les processus de décomposition (Vass, 2012). De plus, les cadavres de porcs peuvent produire exactement les mêmes COV libérés par les restes humains, bien que l'abondance et le temps d'apparition constituent une altération de l'ensemble du profil olfactif terminal. Cela permet d'éviter les complications éthiques liées aux dons de corps. Pourtant, certaines divergences peuvent être notées : les porcs montrent des profils de décomposition différents, se décomposant plus rapidement que les humains ; les restes humains se distinguent par la production d'un plus grand nombre d'esters que les restes animaux, ce qui souligne les différences dans les COV issus de la décomposition (DeGreeff, 2010). Il a également été identifié que 30 des COV sont exclusivement humains, ce qui signifie qu'aucun animal ne peut reproduire l'odeur

humaine à 100 % (Vass *et al.*, 2008). Des installations de recherche, appelées « fermes à cadavres », ont été mises en place pour étudier la décomposition humaine dans divers environnements, bien que leur utilisation soit limitée par des considérations éthiques dans certains pays (Baryah *et al.*, 2019). Ces recherches, principalement menées aux États-Unis et en Australie, où les restes humains peuvent être utilisés à des fins de recherche, ont poussé plusieurs pays à préférer l'entraînement sur des restes humains (DeGreeff et Schultz, 2022). De plus, l'activité des insectes est différente, ce qui peut influencer les résultats des études sur les COV (Knobel *et al.*, 2019). La communauté scientifique reste donc unanime sur le fait que les carcasses humaines sont recommandées pour mettre en évidence le modèle direct de décomposition du corps humain et ainsi permettre la formation correcte de chiens de recherche. (Armstrong *et al.*, 2016 ; Knobel *et al.*, 2019 ; Matuszewski *et al.*, 2020)

Il est essentiel que l'entraînement des chiens favorise une généralisation des odeurs, permettant aux chiens de détecter divers stades de décomposition humaine et d'éviter qu'ils ne deviennent trop sensibles à des variations spécifiques. Cependant, si les entraînements se font sur des restes de porcs, cette généralisation présentera des risques, notamment des risques de faux positifs. (DeGreeff et Schultz, 2022)

- Exemple des insectes

Un sujet d'intérêt actuel est l'utilisation des insectes, comme les asticots, pour collecter des composés organiques volatils (COV) de décomposition. Blana et Prada-Tiedemann ont comparé les profils olfactifs émis par les larves de *Calliphora vicina* et les tissus d'un cadavre de porc (Blana et Prada-Tiedemann, 2020). Les tissus ont produit 134 composés, tandis que les asticots en ont émis 107, dont 30 étaient spécifiques aux insectes. Les proportions de groupes fonctionnels étaient très similaires entre les deux échantillons. Il a été suggéré que les asticots reproduisent fidèlement le profil olfactif des COV associés à la décomposition cadavérique, émettant des composés comme le disulfure de diméthyle, le trisulfure de diméthyle, le phénol et l'indole. Les chercheurs ont également examiné si les asticots émettaient des profils spécifiques de COV en fonction des phases de décomposition. Certains composés, comme le disulfure de diméthyle, le phénol et l'indole, présentaient des variations caractéristiques en fonction du stade de décomposition. Les signatures olfactives des asticots pourraient donc être utilisées pour estimer la durée post-mortem, notamment en l'absence de cadavre et lorsque seules des preuves entomologiques sont disponibles. Une autre approche consiste à évaluer l'âge des mouches via les COV qu'elles émettent, ce qui pourrait également aider à déterminer la durée post-mortem. On peut donc se demander s'il serait envisageable que les chiens formés à la RRH puissent reconnaître certains COV associés à ces insectes.

- Exemple de parties de corps

L'utilisation de restes humains pour la formation des chiens de recherche de restes humaines (RRH) reste la méthode la plus fiable, mais il existe des débats sur le type de restes à utiliser. Les chiens entraînés sur des parties du corps pourraient réagir différemment lorsqu'ils sont confrontés à un cadavre complet, que ce soit à cause de l'intensité inhabituellement élevée de l'odeur ou bien face à l'entièreté d'un corps. Selon certaines anecdotes, des maîtres-chiens ont signalé qu'un chien entraîné sur des parties du corps humain peut ne pas donner la même réponse finale la première fois qu'il est confronté à un cadavre humain intact. (DeGreeff et Schultz, 2022)

Par exemple, les membres amputés volontairement donnés après des chirurgies sont utilisés par la police de l'Ontario. L'étude de Dargan *et al.* visait à analyser les COV de membres amputés de patients diabétiques après des interventions chirurgicales, tout en observant les réactions des chiens à ces aides. Les tests ont été répétés sur 18 mois pour comprendre les éventuels changements des COV au fil du temps (Figure 23), afin de valider leur utilisation comme aides à la formation. L'étude a identifié divers COV associés à la décomposition, ainsi qu'un anesthésique, le sévoflurane, potentiellement utilisé pendant les opérations. Bien que ce dernier soit présent, il n'a pas semblé affecter la capacité des chiens de RRH, qui ont obtenu un taux de détection élevé de 98,4 %. Les résultats ont montré une variation des COV au fil du temps, mais cela n'a pas influencé la réponse des chiens RRH. De plus, les conditions de stockage (température ambiante, réfrigérateur, congélateur) n'ont pas modifié les profils de COV. En conclusion, les membres amputés contiennent suffisamment de COV de décomposition et sont efficaces pour former les chiens, validant leur usage comme aide alternative. (Dargan *et al.*, 2022)

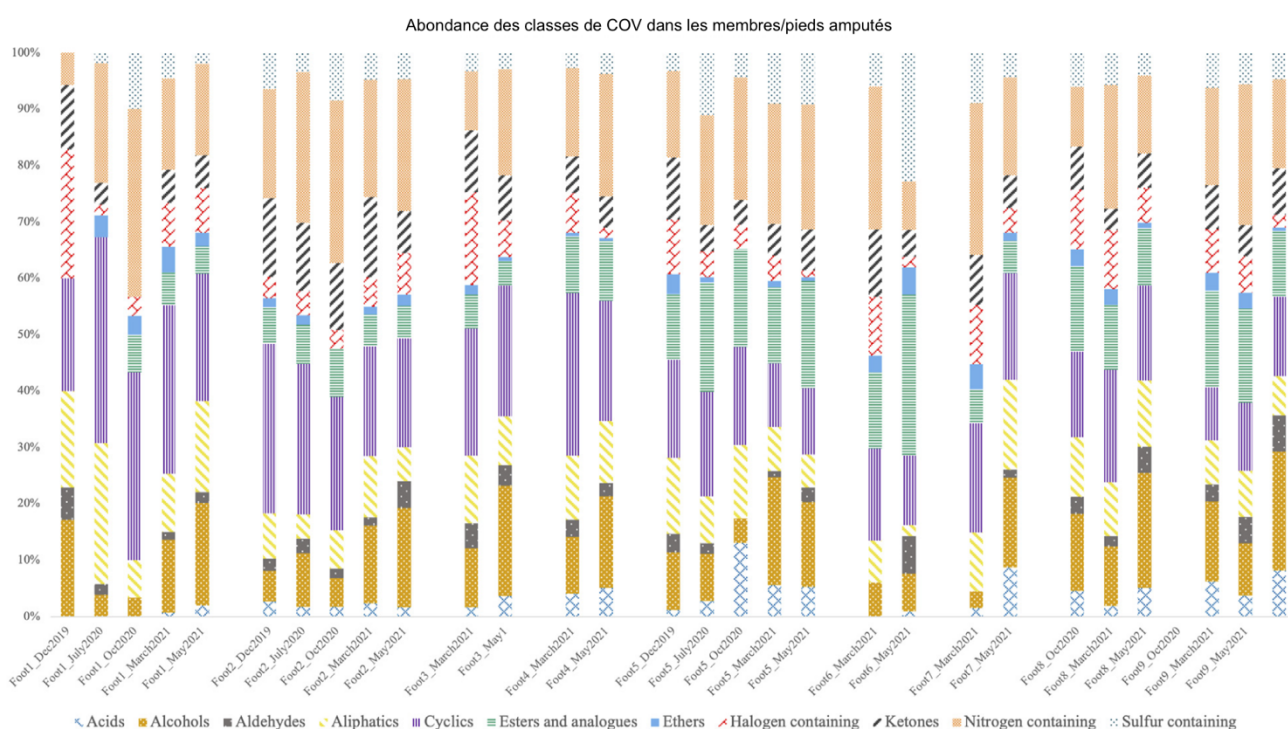


Figure 23 : Classes de COV pour neuf aides à la formation (obtenues à partir de membres/pieds amputés) analysées au cours de cinq mois différents entre décembre 2019 et mai 2021 (d'après Dargan *et al.*, 2022)

Une revue de Dargan et Forbes a analysé les COV identifiés dans divers outils de formation, tels que le sang, les restes humains, les liquides de décomposition, le sol, les restes enterrés, les textiles, et les formulations synthétiques ; ainsi que la capacité des chiens de RRH à réagir à ces différentes aides (Annexe 1) (Dargan et Forbes, 2021). Ces différents supports contiennent des classes variées de composés, comme des composés soufrés, des acides carboxyliques, des alcools, des cétones, et des hydrocarbures. Les tissus humains et le liquide de décomposition sont les plus proches du profil de COV d'un cadavre humain, et les chiens entraînés avec ces aides présentent un taux d'alerte élevé. Le sol sous les restes décomposés peut également être utile pour l'entraînement,

bien qu'il ne retienne pas tous les produits de décomposition. Le sang, surtout à différents stades de vieillissement, est important car certaines scènes de crime impliquent du sang nettoyé, nécessitant une exposition des chiens à du sang sur divers types de surfaces. Certains composés, comme le 2-éthyl hexanol, l'octanal, et le toluène, ont été signalés dans plusieurs études et sont présents à la fois dans les cadavres humains et les aides à la formation, suggérant qu'ils pourraient être significatifs pour les chiens. (Dargan et Forbes, 2021)

Aucun outil de formation n'offre un profil unique de COV, ce qui signifie que former les chiens avec un seul type d'aide n'est pas suffisant. Les formulations synthétiques, avec leur gamme limitée de composés, ne sont donc pas recommandées. Pour améliorer la performance des chiens, il est recommandé de les exposer à autant de COV liés à la décomposition que possible, tout en respectant les contraintes éthiques. Des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les différences entre les profils de COV des aides à la formation et ceux des cadavres humains, en particulier en tenant compte des conditions de stockage et d'environnement. Une meilleure compréhension de ces facteurs permettra d'améliorer et de normaliser les pratiques d'entraînement des chiens de RRH. (Dargan et Forbes, 2021)

B. Pseudo-odeurs :

Les pseudo-odeurs, conçues pour imiter des odeurs cibles comme les drogues, explosifs ou restes humains, sont souvent signalées pour leur manque de fiabilité, notamment pour la détection de restes humains. Des études ont montré que ces pseudo-parfums, principalement composés de cadavérine et de putrescine, ne représentent pas fidèlement l'odeur humaine en décomposition. Les chiens entraînés avec ces composés manquent parfois des restes humains réels, tandis que ceux formés sur de véritables restes ne réagissent pas aux pseudo-odeurs (Tipple *et al.*, 2014), révélant une différence importante. Cela a pu être également prouvé par l'étude de Stadley *et al.*, dans laquelle deux pseudo-odeurs disponibles dans le commerce et utilisées pour l'entraînement des chiens cadavériques ont été analysées à l'aide d'une chromatographie en phase gazeuse bidimensionnelle complète associée à une spectrométrie de masse à temps de vol (GC × GC–TOFMS). Les deux formulations se sont révélées simplistes dans leur composition, par rapport aux mélanges réels de composés organiques volatils (COV) cadavériques, avec seulement quelques composants majeurs. Les sept composés identifiés par ces travaux n'ont pas été signalés auparavant comme produits volatils de décomposition, ce qui indique que ces pseudo-odeurs ne doivent pas être considérées comme une représentation précise de l'odeur de décomposition cadavérique. (Stadler *et al.*, 2012)

Il est complexe de définir précisément les pseudo-odeurs des profils olfactifs liés à la décomposition humaine, car plusieurs facteurs compliquent cette tâche. Tout d'abord, il n'est pas établi quels produits chimiques déclenchent une réponse chez les chiens formés pour détecter des restes humains. De plus, aucun composé chimique unique à l'homme n'a été identifié comme présent lors de tout le processus de décomposition. Par conséquent, en entraînant les chiens sur des substances chimiques génériques associées à la décomposition, leur réponse pourrait être moins spécifique, entraînant des réactions également aux restes d'autres animaux. (Cieśla *et al.*, 2023 ; DeGreeff et Schultz, 2022)

Une étude récente de Martin a évalué par quel moyen la composition chimique des aides à la formation affecte la réponse comportementale de chiens formés à la RRH (Clément, 2022). Bien qu'il existe de nombreux rapports sur la composition chimique des aides à la formation, les

informations restent limitées sur la réponse des chiens de détection face à ces aides. En voici certaines conclusions :

- La première question que l'auteur a posée concerne la capacité des chiens de RRH à reconnaître un mélange synthétique de quelques composants cadavériques. Il a pu montrer que les chiens formés à l'origine avec des aides naturelles (contenant plusieurs centaines de composés), sont capables de détecter un mélange cadavérique simplifié composé de seulement cinq molécules cadavériques et qu'environ 100 ng de composés cadavériques pouvaient encore susciter une réponse positive chez les chiens expérimentés.
- Le DMDS est un composé majeur qui est libéré pendant tout le processus de décomposition et pourrait expliquer pourquoi les chiens RRH sont particulièrement sensibles à ce produit chimique. Les produits chimiques azotés semblent jouer un rôle secondaire dans la détection. Par exemple, l'indole est le seul composé azoté détecté tout au long du processus de décomposition. Comme le DMDS, l'indole est une odeur cadavérique typique qui provient de la décomposition de divers acides aminés aromatiques, dont la phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane. Les chiens se concentrent sur les sous-produits libérés lors de la dégradation des protéines, probablement parce que les aides à l'entraînement naturelles utilisées par leurs maîtres étaient principalement composées de protéines (par exemple, muscle, chair, sang).
- Les chiens de RRH ne ciblent pas des composés spécifiques de cadavres. Lorsque tous les composés cadavériques ont été remplacés par des composés non cadavériques de la même famille chimique, les chiens ont toujours reconnu positivement le mélange imitant une odeur de cadavre. Les chiens comportent donc une capacité de généralisation : les animaux entraînés à répondre à une molécule spécifique sont susceptibles de répondre à tous les composés partageant une structure chimique similaire.

En conclusion, l'utilisation d'une aide simplifiée qui imite l'odeur d'un cadavre en décomposition pourrait aider les chiens RRH à reconnaître tous les composés du mélange et à garantir que tous les chiens réagissent aux mêmes composés, bien que de nouvelles études soient nécessaires. De plus, comme mentionné, les chiens formés avec un mélange complexe n'apprennent qu'un petit nombre de ses constituants pour cibler l'odeur. Le choix des molécules à cibler dans un mélange complexe pourrait être motivé soit par l'abondance des molécules dans le mélange, soit par le nombre de fois que les chiens ont été en contact avec la molécule pendant l'entraînement. (Clément, 2022)

C. Nouvelles technologies d'analyse et de transfert d'odeurs

Dans une étude menée par DeGreeff *et al.*, les auteurs ont cherché à créer des aides à la formation pour les chiens RRH qui étaient non dangereuses et relativement simples à obtenir (DeGreeff, 2010). À l'aide d'une unité de transfert d'odeurs, le STU-100, l'odeur de décomposition a été recueillie sur un matériau absorbant à partir de restes humains fraîchement décédés et incinérés, de restes frais de canidés et de poulets, et d'autres restes, tels que du liquide de décomposition, de l'adipocire ou du sang, qui avaient été préalablement stockés à des températures inférieures à zéro. Après avoir effectué les essais sur le terrain avec ces aides à la formation nouvellement développées, les auteurs ont constaté que près de 90% des canines évaluées ont correctement alerté l'aide contenant l'odeur d'intérêt, révélant son potentiel pour une utilisation sur le terrain. (Furton *et al.*, 2015)

- Collecte et analyse des odeurs

L'odeur de décomposition, souvent appelée "odeur de la mort", est un mélange complexe de composés organiques volatils (COV) libérés lors de la décomposition humaine. Les chiens de recherche de restes humains (RRH) sont censés reconnaître certains de ces COV pour repérer des restes humains, bien que les composés précis qu'ils identifient restent inconnus. Comme les chiens RRH ne peuvent pas spécifier les composés qu'ils associent à la décomposition, les recherches récentes se concentrent sur l'analyse chimique des COV. Ces études, menées sur des restes humains et animaux (Hoffman *et al.*, 2009 ; Verheggen *et al.*, 2017) impliquent un processus en deux étapes : la collecte et l'analyse des COV. La microextraction en phase solide (SPME) est souvent utilisée en laboratoire afin de réaliser une préconcentration efficace des COV, tandis que les tubes de désorption thermique (TD) sont préférés pour les collectes sur le terrain (Dargan *et al.*, 2022 ; Hayes *et al.*, 2018). Traditionnellement, la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) était employée, mais des techniques plus récentes, comme la chromatographie en phase gazeuse bidimensionnelle (GC×GC-TOFMS), offrent une meilleure précision et résolution (Dargan *et al.*, 2022) afin d'évaluer la qualité et la composition des odeurs, ce qui est particulièrement utile pour compléter le travail des chiens. La GC×GC permet une séparation plus fine des mélanges complexes, bien que son utilisation nécessite une interprétation plus approfondie et soit plus coûteuse. Les résultats analytiques ont permis d'améliorer les protocoles d'entraînement des chiens et de clarifier les limites de détection. De plus, ces analyses renforcent la légalité des recherches menées par les chiens, en établissant que certaines réponses positives ne proviennent pas de facteurs externes. (Hayes *et al.*, 2018)

- Exemple de Getxent :

Il peut être avantageux de créer une copie d'odeur pour des raisons de formation et d'exploitation, permettant ainsi un transport et un stockage faciles. Le matériau utilisé pour cette copie doit répondre à plusieurs critères : (Goss, 2019)

- Capacité d'absorption : Il doit pouvoir absorber une quantité suffisante d'odeur pour éviter qu'elle ne s'épuise rapidement lorsqu'exposée à l'air frais, par exemple lors de sa présentation à un chien.
- Concentration comparable : Après la création de la copie, la concentration d'odeur dans l'air ambiant doit être similaire à celle de l'odeur originale.
- Exactitude du motif olfactif : Si l'odeur cible est constituée d'un mélange de plusieurs odeurs, il est crucial que la composition de ce mélange soit reproduite fidèlement. Cela peut s'avérer complexe, car chaque odeur du mélange peut avoir des propriétés d'absorption différentes.

Les tubes Getxent sont un exemple de système de copie d'odeur. Getxent est une entreprise Suisse fondée par deux français, Gregory Herin et Quentin Courrier. Grâce à leurs connaissances sur la chimie et les polymères, ils ont créé un cylindre d'environ 35mm de long et 8mm de diamètre, vide en son centre. Ce tube est au départ neutre d'odeur et surtout non remarquable par un chien d'après plusieurs études et expériences personnelles menées. Une fois mis en contact avec la matière cible, il permet l'absorption de molécules odorantes à la surface du tube suivie d'une adsorption de ces molécules à l'intérieur même du polymère.

Les maîtres-chiens peuvent donc utiliser ces tubes neutres d'odeurs, de façon stérile afin de ne pas contaminer le tube de leur propre odeur, en les disposant par exemple au-dessus de la matière cible

(contact indirect) pendant un à trois jours afin de capter les gaz libérés, de les imprégner dans leur totalité et de les inclure dans la formation ou l'entraînement des chiens. Le tube Getxent a l'avantage supplémentaire de fournir un niveau d'odeur réglable, c'est-à-dire que plus le tube est co-incubé avec des odorants pour « charger » le tube, plus le taux d'émission de ces odorants augmente. (Herin, 2024)

Un second type de Getxent est disponible, le tube Getxent déjà imprégné de l'odeur souhaitée. À la différence des pseudo-odeurs disponibles sur le marché, ces tubes sont imprégnés avec la matière originale, l'odeur est donc réelle. Concernant la RRH, différents types de tubes existent permettant d'obtenir une grande variété de COV (Tableau 1) :

Odeur	Description	Stade de décomposition
Cadavre	Mélange de 2 tissus (muscle + peau) et sternum (os + tissus conjonctifs + cartilage + graisse)	Décomposition active; ne contient ni asticots ni insectes.
Sternum	Sternum (os + tissus conjonctifs + cartilage + graisse)	Décomposition active; ne contient ni asticots ni insectes.
Muscle + peau	Muscle + peau	Décomposition active; ne contient ni asticots ni insectes.
Sang humain	Sang humain liquide	Frais, vieillit et sèche durant l'imprégnation
Os sec	Côtes et cartilage costal	Restes secs
Complexe de tissus mous	Peau complète avec couches sous cutanées, dont graisse, vaisseaux sanguins et lymphatiques, nerfs, muscles, et fascia. Essentiellement une section complète du membre antérieur.	De putréfaction à décomposition avancée.
Restes humains décomposés en milieu aquatique	Complexe de tissus mous, échantillons à 24h postmortem provenant de différents cadavres. Décomposés dans l'eau.	D'autolyse/frais à décomposition avancée.
Restes humains brûlés	Complexe de tissus mous, échantillons à 24h postmortem provenant de différents cadavres. répliqua d'une brûlure au 4e degré obtenu par l'utilisation d'une flamme sur la surface antérieure (derme jusqu'au couches musculaires supérieures) - Sans accélérateur d'incendie	D'autolyse/frais à décomposition avancée.
Restes humains décomposés enterrés	Complexe de tissus mous, échantillons à 24h postmortem provenant de différents cadavres. . Décomposition pendant 2 semaines enterrés à 30cm dans un mélange standardisé de terre arable avec ajout périodique d'eau déionisée.	D'autolyse/frais à décomposition avancée.
Adipocire	Peau jusqu'au muscle superficiel avec un intervalle postmortem de 2 ans. Les tissus ont formé de l'adipocire dans la peau et la couche de graisse sous cutanée	Décomposition avancée

Tableau 1 : Ensemble des matières utilisées pour l'imprégnation de tubes Getxent à partir de cadavres d'êtres humains, imprégnés durant 7 jours (d'après Getxent, 2024)

Différentes études menées ont montré, après analyse à l'aide de la microextraction en phase solide-chromatographie gazeuse-spectrométrie de masse (SPME-GC-MS), que les produits Getxent étaient purs, c'est-à-dire sans molécules odorantes non désirées, la pureté du produit étant extrêmement importante pour la formation des chiens (Simon, 2022). De plus, l'étude de Charles *et al.* confirme que des tubes ultra propres comme Getxent peuvent être utilisés de manière fiable pour entraîner les chiens de manière sûre et précise à la détection du COVID-19.(Charles *et al.*, 2024)

4. Aspects juridiques

Face à ce type de recherche de restes humains, il semblait important de réaliser un aparté sur la législation en cours concernant la validité d'une réponse positive dans un tribunal, la reconnaissance juridique des COV associés à la décomposition humaine ainsi que les lois, ou plutôt l'absence de lois, publiées en lien avec l'utilisation de restes humains dans le cadre de détection par les chiens.

A. La validité d'une réponse positive par un chien

Les chiens de détection, bien que précieux sur le terrain, manquent de méthodes standardisées pour évaluer leur performance de manière fiable. Contrairement aux appareils d'analyse électronique, les chiens n'ont pas d'étalonnage formel, ce qui remet en question leur fiabilité dans un contexte judiciaire. Pour pallier cette lacune, un dispositif appelé étalon de détecteur universel (Universal Detector Calibrant, UDC) a été développé, permettant d'évaluer les capacités olfactives des chiens (Beltz, 2013). L'UDC contient une odeur qui est peu susceptible d'être trouvée dans l'environnement naturel. Le 1-bromooctane (1-BO) est particulièrement idéal comme UDC car il n'est pas connu pour être présent dans un quelconque profil olfactif de médicament, d'explosif ou d'autre aide à l'éducation canine. Il n'est généralement utilisé que dans les réactions de synthèse organique et d'extraction par solvant et est donc assez rare dans l'environnement naturel (Maughan *et al.*, 2024). En utilisant cet appareil, le maître-chien est en mesure de produire une documentation montrant que le chien de détection fonctionnait dans des limites acceptables lorsque des tests particuliers ou des déploiements sur le terrain ont été effectués, ce qui permet au chien de détection d'être aussi objectif et fiable qu'un instrument de laboratoire. Des études ont montré que l'intégration quotidienne de l'UDC n'impacte pas les compétences des chiens à détecter leurs cibles habituelles. (Furton *et al.*, 2015)

Les systèmes juridiques ont évolué différemment à travers le monde, se divisant principalement en tradition juridique « continentale européenne » et « anglo-américaine ». Les cadres juridiques français et allemands relèvent du droit civil, avec des directives précisant la collecte et l'évaluation des preuves. En France, le Code de procédure pénale (CPP) établit les directives, tandis qu'en Allemagne, c'est la Strafprozessordnung (StPO) qui s'applique. En général, les chiens de travail doivent suivre une formation et réussir un examen pour être utilisé par les forces de l'ordre. La structure hiérarchique des enquêtes présente des similitudes entre la police et le parquet, qui sont légalement tenus de recueillir des preuves à charge et à décharge. Les autorités d'enquête disposent d'une certaine latitude dans le choix des méthodes, y compris l'utilisation de chiens pour collecter des preuves matérielles. Cependant, en France, une indication olfactive oriente l'enquête vers des éléments matériels, et les résultats positifs peuvent parfois justifier une prolongation de la garde à vue d'un suspect pour permettre la collecte de preuves supplémentaires. (Woidtke *et al.*, 2023)

Une seule technique, l'odorologie, est considérée comme une preuve judiciaire et ainsi prise en compte dans les tribunaux français. Elle permet d'identifier la présence d'une personne sur une scène de crime à travers son odeur, grâce à des chiens spécialement entraînés. En France, cette méthode est utilisée par la police judiciaire depuis 2003. Des chercheurs du Centre National de Recherche en Neurosciences de Lyon ont analysé les performances des chiens de la police technique et scientifique d'Écully, et leurs résultats ont permis de valider la fiabilité de cette technique, d'instaurer des protocoles stricts et d'obtenir une accréditation. Ainsi, après un programme d'entraînement de 24 mois, les chiens réussissent à reconnaître l'odeur d'une même

personne dans 80 à 90 % des cas, sans confondre avec d'autres odeurs. Par exemple, depuis 2003, l'odorologie a permis de résoudre 162 affaires judiciaires en France. (Marchal *et al.*, 2016)

B. Détection et reconnaissance juridique des COV associés à la décomposition humaine

Une forme de preuve olfactive dans les enquêtes est l'odeur émanant des restes humains en décomposition, qui peut détecter les chiens spécialisés en recherche de restes humains (RRH). Bien que des directives existantes pour l'utilisation de ces chiens, prouvant leur capacité à être formés avec un haut degré de fiabilité, la détection instrumentale des composés organiques volatils (COV) associés à la décomposition humaine pose des difficultés. Cela est dû aux similitudes entre les composés humains et non humains, qui varient selon le stade de décomposition.

Cette question a été mise en lumière lors du procès très médiatisé *The State of Florida vs. Casey Marie Anthony*, où une mère était accusée du meurtre prémédité de sa fille. Après avoir signalé la disparition de Caylee Anthony en juillet 2008, deux chiens HRD ont détecté une odeur suspecte dans le véhicule de Casey Anthony. Des échantillons ont été prélevés et analysés pour rechercher les caractéristiques du COV de la décomposition humaine.

Au cours du procès, des preuves concernant cinq composés spécifiques (tétrachlorure de carbone, chloroforme, disulfure de diméthyle, trisulfure de diméthyle et disulfure de carbone) ont été présentées, mais leur recevabilité a été contestée en raison du manque d'études scientifiques valides et de l'absence de données sur les taux d'erreur de la méthode utilisée. Ainsi, la fiabilité des méthodes instrumentales pour analyser l'odeur de décomposition humaine comme preuve médico-légale reste problématique. (Furton *et al.*, 2015)

C. Utilisation de tissus humains

Bien que l'utilisation de tissus humains à des fins médicales en France soit régie par les lois du don de corps à des fins d'enseignement médical et de recherche du Code de la Santé Publique, celle-ci ne couvre pas la formation des chiens de prélèvement de tissus humains. (Légifrance, 2021)

Finalement, pour résumer ces concepts et identifier les domaines d'amélioration ainsi que les perspectives de la technologie de détection, la compréhension des chiens de détection doit s'étendre aux domaines physiologiques, culturels, juridiques et scientifiquement établis, ainsi que décrire les interrelations entre ces facteurs (Figure 24).

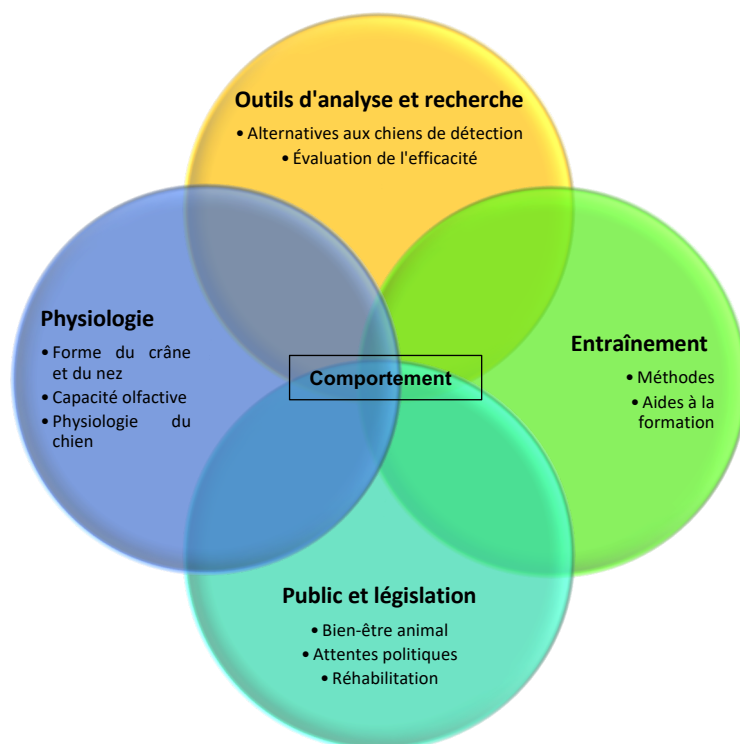


Figure 24 : Relations entre facteurs relatifs à l'efficacité de la recherche avec des chiens (d'après Hayes *et al.*, 2018)

Pour conclure, cette seconde partie met en lumière l'importance des chiens de recherche de restes humains dans notre société actuelle. En effet, il paraît primordial de retrouver un corps, dans un contexte accidentel ou criminel afin que la famille puisse faire son deuil. Ces chiens sont formés par des maîtres-chiens expérimentés, ayant des connaissances accrues concernant le travail du chien, la décomposition et la psychologie humaine. Malgré un travail éprouvant, des aspects juridiques flous, un manque de réponses scientifiques et une reconnaissance peu existante dans notre société, ces binômes font preuve d'une efficacité incomparable. Souvent envoyés les derniers sur intervention, ils représentent souvent la dernière solution pour retrouver un corps. Pourtant, le chien n'est pas un outil infaillible. C'est pourquoi nous nous intéresserons dans les parties suivantes aux différents facteurs, individuels, environnementaux et humains, pouvant affecter l'acuité olfactive canine (Figure 25).

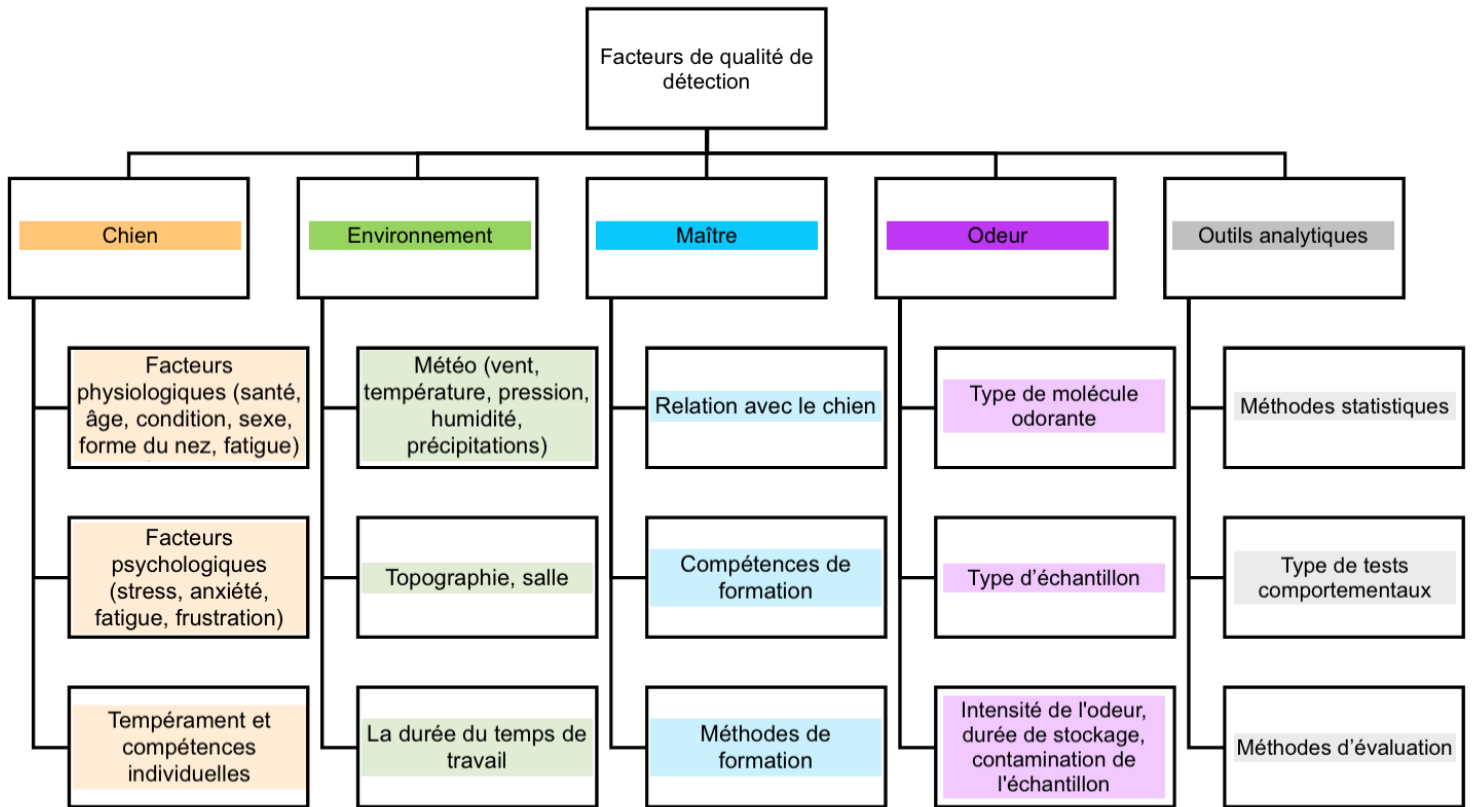


Figure 25 : Facteurs influençant l'efficacité de la détection olfactive canine (d'après Kokocińska-Kusiak et al., 2021)

Troisième partie :

Facteurs individuels canins de variation de l'acuité olfactive

Dans cette première partie traitant des facteurs de variation de l'acuité olfactive canine, nous nous intéresserons aux facteurs individuels, propres à chaque individu, dont plusieurs critères sont pris en compte dans le cadre de la recherche de restes humains. L'équipe cynotechnique du GNICG sera pris comme exemple.

1. L'acuité olfactive canine chez les mammifères

On distingue les animaux microsmatiques, comme les primates, des animaux macrosmatiques, tels que les chiens, qui disposent d'un odorat très développé.(Vadurel et Gogny, 1997)

Cette distinction repose sur la surface de la muqueuse olfactive, le nombre de cellules réceptrices et l'importance relative de la zone olfactive par rapport aux autres régions du cerveau. À titre d'exemple, on peut citer la surface de la muqueuse olfactive correspondant à 200 cm² chez le chien et 10 cm² chez l'Homme.(Grandjean et Haymann, 2010)

2. Choix de la race

A. L'acuité olfactive des différentes races

L'acuité olfactive est variable selon les races de chien, en fonction de la surface de la muqueuse olfactive, du nombre de cellules réceptrices et de la morphologie crânienne par exemple. Afin que le flux d'air entrant entre en contact avec une plus grande surface de cellules réceptrices à haut débit, il est préférable par exemple de choisir des races mésocéphales. À titre de comparatif, on peut citer la différence du nombre de cellules olfactives : 220 millions pour un labrador contre 70 millions pour un Cocker Spaniel. Les chiens de Saint-Hubert, avec 300 millions de cellules réceptrices sont considérés comme les plus performants (Grandjean et Haymann, 2010). Des études limitées montrent que les races sélectionnées pour leurs capacités olfactives, comme les beagles, surpassent celles non spécialisées, comme les lévriers. De plus, les races brachycéphales ont montré la plus faible sensibilité à la détection de l'odeur par rapport aux races non brachycéphales. Cela suggère que la structure olfactive influence les performances, bien que d'autres facteurs comme l'âge, la santé, le régime alimentaire puissent également jouer un rôle. (Lazarowski *et al.*, 2020)

Les gènes des récepteurs olfactifs forment la plus grande famille de gènes chez les mammifères. Étant donné la diversité génétique et raciale des chiens, des études ont exploré le lien entre la capacité olfactive et les races. Certaines recherches ont identifié des allèles spécifiques à certaines races, suggérant que le polymorphisme génétique des récepteurs olfactifs peut influencer l'aptitude

olfactive des chiens. Cependant, les résultats concernant les races les plus adaptées à la détection olfactive sont variés et non cohérents : certains auteurs suggèrent que les différences liées à la spécificité de la race n'existent pas (Hall *et al.*, 2015) alors que d'autres montrent une supériorité des Bergers Allemands comparativement aux terriers (Jeziarski *et al.*, 2014) ou que les races spécifiquement sélectionnées pour le travail olfactif conservent de meilleures capacités olfactives, tandis que les races à museau court comme les brachycéphales montrent des performances inférieures.(Polgár *et al.*, 2016)

En plus de la génétique, des traits comportementaux comme la motivation et l'envie d'apprendre, la capacité d'apprentissage et la capacité à travailler avec les humains pourraient également jouer un rôle important.

Enfin, le choix traditionnel d'un pays pour une race, sa disponibilité et les opinions actuelles sont aussi à prendre en compte.

B. Critères de choix de la race

Bien que des études montrent que les races sélectionnées pour leurs capacités olfactives performant mieux, des résultats surprenants montrent que les carlins surpassent les bergers allemands dans certaines tâches de discrimination olfactive. Cela souligne que d'autres facteurs, comme l'athlétisme et le comportement, peuvent influencer la performance olfactive. Les chiens courants, malgré leur acuité olfactive, sont rarement utilisés en détection en raison de leur faible aptitude à l'entraînement (Lazarowski *et al.*, 2020). Le chien doit donc également être agile, vigoureux et puissant, ce qui lui permettra de travailler longtemps sur des terrains difficiles.

Le type de pelage est également important, car les chiens de recherche doivent travailler dans toutes les conditions météorologiques. Les chiens avec un sous-poil dense et imperméable sont particulièrement appréciés pour leur résistance aux intempéries. Ainsi, le choix de la race pour les chiens de recherche repose sur un équilibre entre les capacités olfactives et les qualités physiques et morphologiques. Bien que de nombreuses races présentent ces caractéristiques, certaines se distinguent davantage dans ce domaine.

C. Races utilisées au GNICG et en RRH

Pour information, la majorité des chiens formés au centre de Gramat sont des bergers belges. Dans l'équipe du GNICG, on retrouve une majorité de bergers belges malinois, quelques bergers hollandais, un Springer Spaniel et un Staffordshire Bull Terrier.

Une enquête réalisée par Clément Martin a permis de mettre en évidence différents éléments concernant le choix de la race dans le domaine de la RRH. Une série de questions a été envoyée aux brigades de recherche de restes humains à travers le monde, 16 brigades différentes dont 50 maîtres-chiens y ont répondu permettant ainsi de mettre en avant différentes tendances (Clément, 2022). Concernant les races utilisées, il s'agit principalement des Berger Belges Malinois, Bergers Allemands, Épagneul anglais et du Labrador (Figure 26).

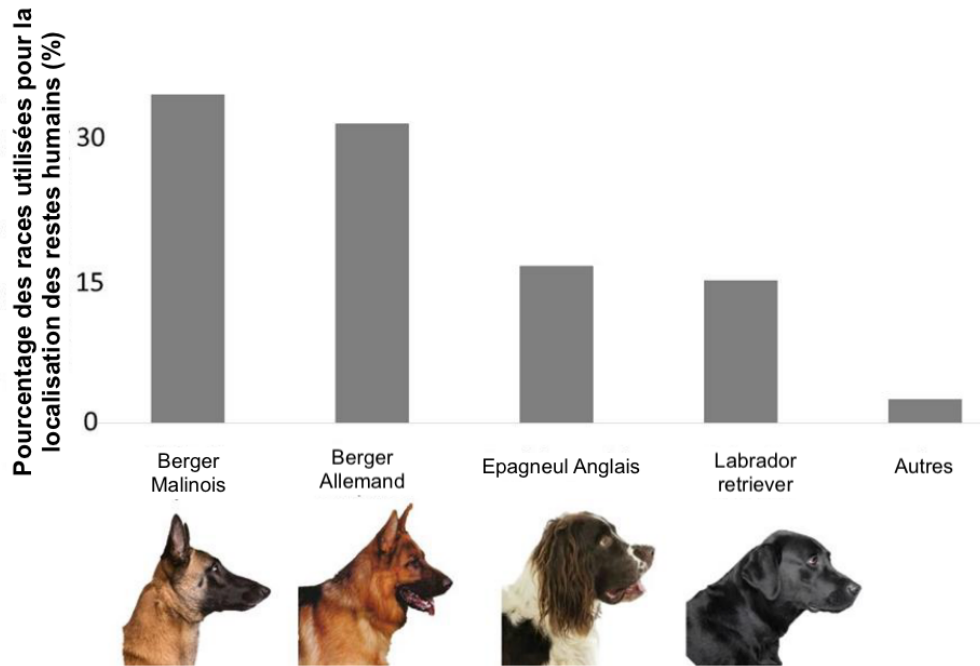


Figure 26 : Races actuellement utilisées comme chiens de détection de restes humains sur les cadavres, selon une enquête réalisée par dix brigades d'Europe et du Canada (d'après Clément, 2022)

3. Choix de l'individu

Le choix du bon chien est primordial, qu'il soit chiot ou adulte, certains critères de base permettront la formation d'une équipe cynotechnique opérationnelle.

A. Critères de choix de l'individu

La précision, c'est-à-dire la capacité à détecter correctement une odeur cible, est cruciale dans les tests olfactifs. Un chien efficace doit avoir un bon nombre de vrais positifs et peu de faux négatifs. (DeGreeff et Schultz, 2022)

Les chiens de travail, notamment militaires et policiers, font face à des situations stressantes, ce qui peut affecter leur efficacité et leur bien-être. Identifier les chiens qui réagissent de manière adéquate à ces situations est donc important, mais peut paraître compliqué. Par exemple, une étude a examiné les réponses comportementales de 85 chiens de travail militaires lors de tests de tempérament standardisés ainsi que leurs niveaux de cortisol avant et après l'exercice. Il a étonnement été montré que les chiens retenus ont montré une plus grande émotivité et des niveaux de cortisol plus élevés que ceux non retenus. Cela peut suggérer que malgré une réussite à certains tests standardisés, il est possible qu'il existe des biais dans le processus de sélection. (Foyer *et al.*, 2016)

Dans une autre étude, les traits comportementaux de 197 chiens ont été évalués pour améliorer la sélection des chiens détecteurs de drogues. Deux composantes principales ont été identifiées : le

désir de travailler et la distractibilité. Un fort désir de travailler était significativement lié à la réussite de la formation, permettant ainsi de rejeter un bon nombre de chiens inappropriés avant le début de la formation. (Maejima *et al.*, 2007)

Enfin, l'un des principaux critères dans le choix d'un chien de recherche est son intérêt pour le jeu. En effet, il est essentiel que le chien soit très joueur, car l'apprentissage du travail de détection repose en grande partie sur le jeu.

D'après l'étude de Martin Clément, des traits physiques et comportementaux sont sélectionnés préférentiellement par une majorité de maîtres-chiens dans le domaine de la RRH (Figure 27). On peut citer l'agilité et l'endurance qui sont considérées comme très importantes ainsi que l'enjouement, la curiosité, la sociabilité, l'indépendance et le dynamisme. (Clément, 2022)

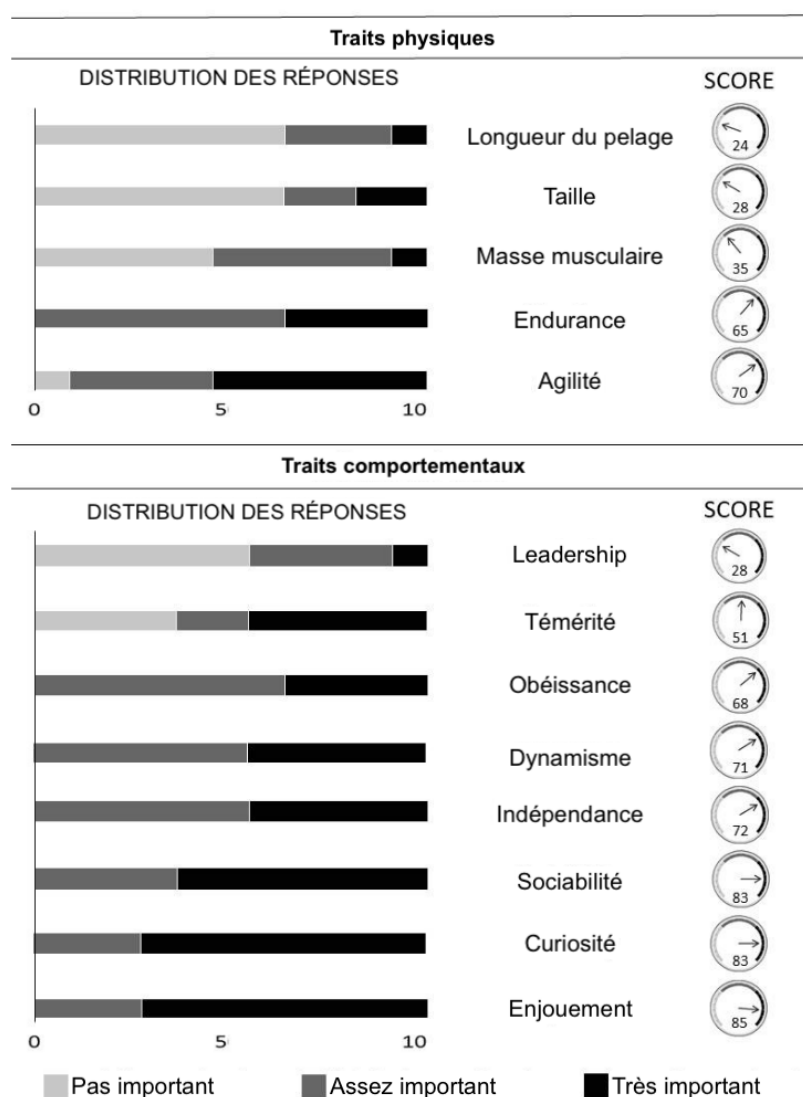


Figure 27 : Estimation par les maîtres-chiens de l'importance des traits physiques et comportementaux qui doivent être pris en compte lors de la sélection des chiens détecteurs de restes humains (d'après Clément, 2022)

B. Méthodes de sélection

Dans le cas général de la Gendarmerie Nationale, les maitres-chiens se voient confiés un chien adulte, en cours d'apprentissage avec un formateur, depuis plusieurs mois. Ces formateurs réalisent ainsi une pré-sélection afin de former un groupe de chiens qu'ils associeront avec un maitre-chien selon les affinités de chacun.

Dans le cas du GNICG, les chiens sont recrutés directement par les maîtres-chiens, anciens formateurs pour la plupart, à différents âges. Une sélection principalement comportementale est réalisée, sans qu'aucun protocole spécifique à la recherche de restes humains n'ait été décrit dans la littérature. La plupart des tests se feront avec un jeu, afin de voir l'attrait du chien pour cette motivation. Jouer avec le maitre-chien, rechercher le jeu ou la réponse à des stimuli effrayants seront par exemple utilisés pour avoir une première idée du tempérament global du chien. Une autre étape importante est la mise en contact avec l'odeur de restes humains afin d'évaluer la réponse à ces nouvelles molécules odorantes, réponse pouvant être plus ou moins dans l'aversion.

On peut citer tout de même l'article de Wilsson et Sinn dans lequel le test T-SAF a été analysé et qui reprend les principaux exemples de tests comportementaux réalisés. Les chiens sont évalués à travers un test comportemental composé de 12 sous-tests différents (Annexe 2), permettant d'examiner leurs réactions face à divers stimuli potentiellement effrayants, comme l'apparition soudaine de mannequins, des bruits forts ou des structures de sol instables. Des situations non menaçantes, telles que la volonté du chien de coopérer et d'interagir socialement avec les humains, sont également observées. Chaque chien reçoit une valeur d'indice attribuée sur la base des scores subjectifs donnés par le responsable du test, indiquant la probabilité de réussir un programme d'entraînement militaire. La valeur d'indice compare les scores d'un chien à ceux de tous les chiens testés précédemment. Une valeur d'indice de zéro indique une chance de 50 % de réussir l'entraînement en fonction des données historiques. Plus la valeur d'indice est élevée, plus le chien a de chances de réussir. Un chien avec une valeur d'indice supérieure à 0 est considéré comme approuvé dans le test T SAF (Wilsson et Sinn, 2012). Ce type de test permettrait donc d'éviter la formation de chiens non aptes à devenir chien de recherche.

Enfin, d'après l'étude de Martin Clément, il a pu mettre en évidence certaines tendances dans le monde de la RRH (Clément, 2022) :

- Toutes les équipes (sauf une) ont déclaré mettre en place des tests de sélection faits maison pour évaluer les capacités d'apprentissage des chiots lors des séances d'entraînement préliminaire. La morphologie et les traits comportementaux sont observés principalement, ainsi que l'agilité et l'endurance.
- Il n'y a pas de sélection en fonction des caractéristiques olfactives ni en fonction des capacités du chien à faire face à des situations stressantes.
- La collecte de jeux et de nourriture, représentant la collecte de récompense, est un des points les plus importants afin que le chien ait un fort désir de s'entraîner et d'obtenir sa récompense.
- Deux autres motivations doivent être prises en compte par les maitres-chiens : la chasse et la proie permettant de connaître la motivation du chien à localiser une cible sans la percevoir en utilisant son nez. Mais cela ne doit pas être majoritaire afin que le chien n'attaque pas la cible lorsqu'il la trouve.

- Une autre pulsion importante est la pulsion de meute/sociale permettant au chien de travailler avec des humains inconnus sans exprimer d'anxiété ou de peur, de comprendre les gestes et ordres du maître.
- Enfin, la capacité du chien à faire face à une situation stressante (stimuli auditifs, tactiles, visuels) est aussi un trait comportemental important à considérer avec la capacité à travailler sur des surfaces de sol différents.

Finalement, aucun test d'évaluation des performances et aucune mesure des compétences n'ont été trouvés dans la littérature pour les chiens de RRH, expliquant très probablement pourquoi les maîtres-chiens continuent d'effectuer des procédures de sélection maison.

4. Facteurs physiologiques de variation de l'acuité olfactive

A. Le sexe

Les recherches de Wei et al. montrent que les cellules des bulbes olfactifs des femelles sont plus actives que celles des mâles (Wei *et al.*, 2016). De plus, il est intéressant de noter que les femelles manifestent également une plus grande excitation comportementale, ce qui pourrait s'expliquer par une motivation accrue à retrouver leur propriétaire, étant donné que les femelles semblent plus enclines à interagir avec les humains et se concentrer sur des stimuli sociaux. Elles surpassent d'ailleurs les mâles dans des tâches de résolution de problèmes insolubles, demandant davantage d'aide aux humains dans ces situations. Concernant les compétences olfactives, aucune différence majeure n'est observée entre les sexes, à l'exception des femelles, qui pourraient moins bien discriminer leurs proches sans familiarité préalable. Les mâles, quant à eux, sont plus portés à renifler dans des contextes liés à la sexualité. La plus grande activité des femelles pourrait ainsi être liée à leur sociabilité plus développée, renforçant leur motivation à chercher leur propriétaire. (Bräuer et Blasi, 2021)

Bien que les femelles semblent avoir des capacités olfactives supérieures, la majorité des chiens de recherche en France sont des mâles. Cette situation peut s'expliquer par le fait que les femelles ne peuvent pas travailler lorsqu'elles sont en chaleur, ce qui dure environ deux à trois semaines, deux fois par an. D'une part, elles peuvent être moins concentrées sur leur tâche, et d'autre part, leur présence peut perturber le travail des mâles, sur un terrain contaminé ou bien en entraînant des conflits entre eux.

Au GNICG, par exemple, une majorité de chiens mâles est présent avec seulement trois femelles dans l'équipe.

B. L'âge

Comme pour les autres sens, les capacités olfactives peuvent décliner avec l'âge en raison de modifications atrophiques, telles qu'une dégénérescence de l'épithélium olfactif et une réduction du nombre de cellules olfactives chez les chiens âgés de plus de quatorze ans (Hirai *et al.*, 1996). Cependant, par rapport aux chiens plus jeunes, les chiens âgés peuvent posséder une mémoire olfactive à long terme plus développée et être capables de traiter des informations olfactives plus complexes. (Wei *et al.*, 2016)

Pour les chiens de recherche de restes humains en France, l'âge médian de départ à la retraite est d'environ neuf ans. Cet âge peut varier en fonction de l'état physique du chien, avec notamment l'apparition de signes d'arthrose, et surtout du degré de formation du second chien plus jeune du maître-chien. L'âge moyen des chiens présents au GNICG est d'environ 5,8 ans.

C. La nutrition et hydratation

Parmi les facteurs environnementaux pouvant influencer l'acuité olfactive, différents articles mentionnent des éléments alimentaires qui ont des effets soit négatifs, comme l'huile de coco, soit positifs, tels que l'huile de maïs, l'EPA, le DHA, le DPA et les protéines animales, sur la performance olfactive des rats. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Pourtant l'étude d'Angle *et al* n'a pas permis de le démontrer chez le chien : dans cette étude, 17 chiens détecteurs certifiés ont été nourris avec trois régimes alimentaires différents (riches en graisses, faibles en graisses ou riches en graisses polyinsaturées) pendant 12 semaines. Après cette période, les performances olfactives ont été évaluées à l'aide d'une roue olfactive et de trois types d'explosifs. Les chiens ont effectué entre huit et douze essais olfactifs avant et après un exercice physique de 30 minutes sur tapis roulant, pendant cinq jours consécutifs. Un modèle de régression logistique a été utilisé pour déterminer si le régime alimentaire, l'exercice, le nombre d'essais, l'odorant, la masse et la position de la cible influençaient la probabilité pour les chiens de détecter l'odeur cible. Aucun changement significatif dans la capacité des chiens à détecter les odeurs à seuil n'a été observé. (Angle *et al.*, 2014)

De plus, il est noté que pour les chiens de traîneau en entraînement, un régime alimentaire contenant 18% de protéines en termes d'énergie (3,0 g de protéines/kg de poids corporel) ne suffit pas à couvrir leurs besoins métaboliques. Pour un travail intense fractionné, un régime avec 35 % de protéines (6,0 g/kg) peut améliorer les performances en augmentant le volume plasmatique (Reynolds *et al.*, 1999). Globalement, on peut en déduire que le travail olfactif, qui combine activité physique et mentale, exige de grandes quantités d'énergie fournit par l'alimentation. Les besoins énergétiques des chiens de détection sont environ deux fois supérieurs à leurs besoins de repos, probablement en raison de l'attention mentale requise par leur travail, même s'il n'est pas physiquement exigeant. (Jenkins *et al.*, 2018)

Bien que les effets de l'état nutritionnel sur l'acuité olfactive n'aient jamais été prouvés chez le chien, il est recommandé de ne pas nourrir un chien de recherche avant un entraînement ou une mission, afin d'éviter qu'il ne travaille pendant la période postprandiale. En effet, les performances olfactives diminuent durant la digestion. Cette précaution permet également de prévenir des problèmes tels que la dilatation torsion de l'estomac, surtout si le chien doit partir en intervention immédiatement après avoir mangé. Il est essentiel de leur fournir une alimentation équilibrée et en quantité adéquate, car toute malnutrition ou carence peut affecter leurs performances physiques et olfactives.

Enfin, la nutrition pourrait jouer un rôle dans la gestion du stress et de l'agressivité chez les chiens de travail. Par exemple, des régimes à faible teneur en protéines avec supplémentation en tryptophane ont montré une réduction de l'agressivité et du stress chez les chiens (DeNapoli *et al.*, 2000 ; Sechi *et al.*, 2017). Ces résultats suggèrent que la manipulation alimentaire pourrait être une stratégie potentielle pour améliorer le comportement des chiens de travail, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires avant d'appliquer ces méthodes sur le terrain.

Un dernier point crucial, souvent négligé, est de s'assurer que le chien dispose d'une hydratation suffisante. La quantité minimale d'eau recommandée est de 60 mL/kg/jour, pouvant atteindre jusqu'à 300 mL/kg/jour dans des conditions extrêmes. La déshydratation pourrait induire une réduction de l'activité enzymatique et une déshydratation nasale, altérant ainsi les capacités olfactives. Des études montrent que la déshydratation peut sérieusement affecter les performances des chiens de travail, comme observé lors des opérations de secours après les attentats du 11 septembre ou le tremblement de terre en Haïti. Une étude récente a testé trois stratégies d'hydratation (eau, solution électrolytique, et liquides sous-cutanés) sans résultats significatifs, bien que la consommation volontaire de la solution électrolytique ait amélioré l'hydratation. (Jenkins *et al.*, 2018)

D. L'état physique

Un mauvais flux d'air, qui affecte les capacités olfactives, peut être provoqué par des maladies comme des tumeurs nasales, des traumatismes locaux ou des infections spécifiques comme la maladie de Carré ou la parainfluenza. Dans les cas d'hyposmie chez les chiens liés à des troubles endocriniens tels que l'hyperadrénocorticisme, l'hypothyroïdie ou le diabète, un mécanisme neuronal pourrait être en cause, similaire à l'anosmie observée chez les humains infectés par le COVID-19. Dziecioł *et al.* ont suggéré, dans une étude sur les caractéristiques IRM canin, que l'imagerie par résonance magnétique de la tête pourrait être utile pour développer le diagnostic in vivo de l'organe vomeronasal et détecter d'éventuelles pathologies chez des animaux ayant des problèmes de comportement liés à une mauvaise communication sémiachimique. (Dziecioł *et al.*, 2020 ; Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

Outre la maladie, la condition physique d'un chien et la durée d'exercice sont des éléments extrêmement importants à prendre en compte, déterminant l'acuité physique du chien.

L'étude de Aviles-Rosa *et al.* avait pour objectif d'évaluer l'impact de la durée et de l'intensité de l'exercice sur les seuils de détection olfactive des chiens. Les résultats montrent une corrélation négative entre l'intensité et la durée de l'exercice et la sensibilité olfactive. Durant les 10 premières minutes, les chiens ont obtenu un taux de réussite supérieur à 80 % pour toutes les concentrations testées, tant lors d'exercices à faible qu'à intensité modérée. Cependant, après 20 minutes d'exercice à intensité modérée, le taux de réussite pour la concentration la plus faible a chuté à 0 %, alors que les mêmes chiens ont conservé un taux de réussite supérieur à 75 % pour cette concentration lors d'un exercice à faible intensité. À l'inverse, la détection des concentrations plus élevées (100 à 1 000 fois le seuil) n'a pas été affectée par l'intensité ou la durée de l'exercice, suggérant que les chiens pouvaient maintenir leurs performances pour ces concentrations, même lors d'un effort modéré. Ces résultats indiquent que, face à des concentrations faibles d'odeurs, les performances des chiens diminuent avant d'atteindre une fatigue physique importante. Ces données suggèrent qu'après 20 minutes d'exercice modéré, la détection des odeurs proches du seuil olfactif pourrait être significativement réduite. Bien que l'étude ait été menée sur un échantillon limité de trois chiens, elle est cohérente avec des travaux antérieurs montrant une diminution des performances olfactives après un exercice sur tapis roulant. (Aviles-Rosa *et al.*, 2024)

Le prolongement de l'exercice physique conduit à une élévation de la température corporelle. Pour se refroidir, le chien halète davantage, mais il ne peut pas renifler et haleter en même temps d'après les dernières études publiées, ce qui réduit le rythme de reniflement. En conséquence, ses performances olfactives diminuent. Cependant, des études ultérieures ont montré que les chiens peuvent améliorer leurs performances en s'adaptant à des conditions physiques extrêmes. Cette

amélioration ne semble pas due à une meilleure condition physique, mais plutôt à un ajustement de leur rythme de reniflement, probablement grâce à une concentration accrue sur leur recherche. Il est donc important d'alterner les périodes de travail et de pause. Selon la FEMA (Federal Emergency Management Agency), une période de repos toutes les 20 à 45 minutes de travail est recommandée, d'une durée équivalente au temps de travail afin de gérer la fatigue olfactive. Cela permet donc aux chiens de récupérer et ainsi d'optimiser l'efficacité des opérations de recherche. Cette optimisation peut aussi être travaillée : les entraînements en conditions extrêmes, similaires à celles rencontrées sur le terrain, sont donc importants afin de repousser les limites olfactives du chien.

Pour conclure cette étude des différents facteurs individuels influençant l'acuité olfactive chez les chiens, nous pouvons souligner plusieurs points clés. D'abord, l'acuité olfactive canine est complexe et varie selon plusieurs aspects biologiques et environnementaux. La sélection de la race est un facteur crucial, certaines races étant mieux adaptées à des tâches spécifiques en raison de leurs capacités olfactives distinctes. Les critères de choix de la race et les statistiques des races utilisées montrent une tendance à privilégier des races comme les bergers dans les disciplines nécessitant un odorat affûté. Ensuite, au niveau individuel, la sélection du chien joue également un rôle. Des critères comme la santé générale, les performances passées, et même des méthodes de sélection génétiques entrent en compte pour choisir les chiens les plus aptes. Le sexe, l'âge, l'état nutritionnel et physique sont des facteurs physiologiques déterminants de l'acuité olfactive, influençant la capacité du chien à détecter et discriminer les odeurs. Cette multiplicité de facteurs montre que l'acuité olfactive n'est pas seulement une caractéristique innée, mais qu'elle peut être optimisée par la sélection rigoureuse et des soins adaptés.

Quatrième partie :

Facteurs environnementaux de variation de l'acuité olfactive

Nous nous intéresserons ensuite aux facteurs environnementaux pouvant impacter l'acuité olfactive canine.

1. Température et humidité

Des températures élevées, supérieures à 15°C, peuvent affecter négativement l'olfaction des chiens en réduisant leur capacité de travail, ce qui diminue leurs performances de recherche (Bräuer et Blasi, 2021). En plus de l'effet direct de la chaleur, il existe un risque de déshydratation, qui altère l'efficacité olfactive en perturbant l'activité enzymatique et la fluidité des muqueuses nasales. Il est cependant difficile de déterminer si la baisse des capacités de détection résulte des conditions physiologiques des chiens ou des facteurs environnementaux qui influencent la diffusion de l'odeur, comme la température de l'air ou l'humidité relative. Ces facteurs influencent par exemple la vitesse d'évaporation des sources odorantes et l'activité bactérienne qui libère les vapeurs odorantes. (Bräuer et Blasi, 2021 ; Jones *et al.*, 2004)

Il a été montré que l'humidité élevée améliore les performances des chiens de recherche en augmentant l'humidité nasale et en intensifiant le piégeage des molécules odorantes, tandis que des conditions chaudes et sèches, avec des températures dépassant 30 °C et une humidité inférieure à 10 %, peuvent significativement réduire les capacités olfactives des chiens. (DeGreeff et Schultz, 2022)

2. Précipitations

Bien que l'humidité accrue due à une légère pluie soit généralement perçue comme bénéfique pour la détection des odeurs, une pluie abondante peut avoir l'effet inverse en forçant les odeurs à se déposer au sol (Bräuer et Blasi, 2021). De même, dans des conditions brumeuses, l'humidité peut suspendre les molécules odorantes dans l'air, obligeant les chiens à scanner de plus vastes zones, ce qui ralentit le processus de suivi. (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021)

3. Pression atmosphérique et champs électromagnétiques

La pression barométrique et l'altitude peuvent influencer directement l'olfaction et les performances des tâches liées à l'odorat. En conditions de basse pression, les seuils olfactifs chez l'homme ont été signalés comme modifiés. L'effet de l'altitude sur les capacités olfactives est probablement lié aux impacts systémiques sur l'oxygénation. (Jenkins *et al.*, 2018)

Ainsi, lors d'une recherche, il peut être intéressant de connaître ces facteurs de variations afin d'éviter d'engager des chiens, sur intervention ou lors d'entraînements, en conditions défavorisantes.

Ainsi, de nombreux facteurs environnements peuvent influencer physiquement sur l'olfaction canine.

Cinquième partie :

Facteurs humains de variation de l'acuité olfactive

L'acuité olfactive canine possède de très nombreuses caractéristiques que l'on peut appliquer à la détection d'odeurs humaines. Par exemple, il a été montré que les chiens manifestent une excitation accrue lorsqu'une personne familière remplace une personne cible, ce qui suggère qu'ils ont une représentation de leurs propriétaires basée sur leur odeur individuelle. Cela montre que les chiens ne perçoivent pas les odeurs de manière neutre, mais associent une odeur activement à ce qu'ils recherchent (Bräuer et Blasi, 2021). Bien que l'on ait proposé que les chiens puissent détecter des molécules d'ADN par l'odorat, cette théorie est contestée, car les fragments d'ADN ne sont pas suffisamment volatils (Jeziarski *et al.*, 2016). Néanmoins, des études montrent que les chiens, y compris ceux entraînés pour le travail de pistage ou de recherche de traces humaines, peuvent distinguer les odeurs corporelles d'individus et cela même en cas de mélange d'odeur. Cela démontre leur capacité à identifier des personnes par leur odeur unique, même entre jumeaux identiques. (Kalmus, 1955)

La taphonomie est définie comme « l'étude de la décomposition d'un organisme ». En pratique, elle s'intéresse aux facteurs qui influencent et affectent ce processus. Différents champs d'études existent dans la taphonomie, incluant les aspects biologiques, culturels et géologiques. Lorsqu'elle est appliquée à la criminalistique, la taphonomie, terme introduit dans les années 1940, examine les spécificités des processus post-mortem ainsi que les causes potentielles de ces changements. La taphonomie médico-légale englobe divers domaines tels que la médecine légale, l'archéologie et la paléobiologie et peut donc être considérée comme l'étude interdisciplinaire des altérations physiologiques qui se produisent dans un organisme après la mort. (Schotsmans *et al.*, 2017)

Dans cette dernière partie, nous nous intéresserons donc à la taphonomie humaine et les facteurs environnementaux influençant la décomposition humaine afin de mettre en relation ces éléments avec le profil olfactif de cadavre permettant aux chiens de localiser un corps humain.

1. Étapes de la décomposition humaine

Afin d'appréhender au mieux la détection canine de restes humains, étudions tout d'abord les étapes de décomposition humaine.

A. Décomposition cellulaire

La décomposition est un mécanisme fixe qui affecte les cellules, les systèmes et enfin le corps entier. Chaque cellule a une structure fondamentale comprenant un noyau, des mitochondries, une membrane cellulaire, et bien d'autres composants. Le noyau est le centre de contrôle de la cellule, tandis que les mitochondries fournissent l'énergie nécessaire via l'adénosine triphosphate (ATP).

La membrane cellulaire, une structure complexe composée de couches lipidiques, permet le contrôle de ce qui entre et sort de la cellule à travers des canaux et des récepteurs variés. Pour fonctionner

correctement, une cellule a besoin d'une température stable (environ 37°C chez l'homme) afin que la vitesse des processus chimiques ne soit pas modifiée, d'un équilibre en eau entre les milieux intracellulaire et extracellulaire afin de garder un pH stable, ainsi qu'une énergie suffisante fournie par l'ATP afin d'alimenter les réactions chimiques permettant les échanges de molécules.

La décomposition cellulaire se produit lorsque les conditions essentielles au maintien de la vie cellulaire (température, équilibre en eau, énergie) sont perturbées. Si la cellule n'a pas assez d'énergie (ATP), si elle est exposée à une mauvaise température ou si son équilibre hydrique est rompu, cela peut entraîner sa mort cellulaire. Ce processus peut commencer quelques minutes après la mort et varie selon les types de cellule. Certaines comme celles contenant des protéases ou des lipases se décomposent plus rapidement que d'autres. Cette décomposition est aussi influencée par de nombreux facteurs environnementaux. (DeGreeff et Furton, 2011)

La décomposition cellulaire se déroule en deux étapes (Stejskal, 2012) :

- Phase réversible :

Le manque d'énergie ralentit les processus biochimiques et perturbe l'équilibre interne de la cellule. L'acidité augmente et la cellule se remplit de déchets. Si les conditions normales sont rétablies, la cellule peut survivre. Sinon, elle progresse vers une décomposition irréversible.

- Phase irréversible :

La cellule se gonfle sous la pression interne, provoquant la rupture de la membrane cellulaire. Les enzymes à l'intérieur de la cellule fuient et détruisent les cellules voisines. Cela conduit à la désintégration des tissus qui deviennent fragiles.

B. Décomposition systémique

La décomposition systémique qui s'ensuit affecte alors le corps entier. Les changements dans la température corporelle, la circulation sanguine et le pH influencent la décomposition à l'échelle des organes et systèmes. La décomposition peut être divisée en dix stades ou en trois grandes phases : la décomposition immédiate (au niveau cellulaire), la putréfaction et la post-putréfaction. Ces étapes varient en fonction des conditions environnementales, qui seront explorées par la suite.

Voici une description succincte de chacun de ces stades, nous permettant de mieux comprendre la difficulté de recherche de restes humains par la suite. (Stejskal, 2012)

a. Stade putride, phase précoce

- Stade 1 : Immédiat

Comme nous l'avons vu précédemment, la décomposition commence au niveau cellulaire, divisée en deux phases : réversible et irréversible. Les premiers signes visibles incluent une pâleur de la peau et un relâchement de certains muscles incluant une lividité fixée et une odeur putride précoce. (Clark *et al.*, 1997). Cette phase se produit généralement dans les 20 minutes *post-mortem*. (Onyejike *et al.*, 2022)

- Stade 2 : Premières heures

Les signes les plus évidents de la progression de la décomposition sont de trois types. (Clark *et al.*, 1997)

L'*algor mortis* désigne le refroidissement du corps après la mort. En l'absence de circulation sanguine due à l'arrêt cardiaque, le corps commence à perdre de la chaleur, partant d'une température moyenne de 37 °C. En général, la température diminue d'environ 1,5 °C par heure, mais cela peut varier selon la température corporelle au moment du décès et les conditions ambiantes.

Le *livor mortis*, ou lividité cadavérique, désigne l'accumulation de sang dans les parties les plus basses du corps selon la gravité, ce qui entraîne une décoloration de la peau vers une teinte bleutée. Ce phénomène débute généralement environ deux heures après le décès, la couleur passant du rose au rouge puis s'assombrissant. La lividité peut être vérifiée en appuyant sur une zone décolorée : si la peau blanchit, cela indique que le corps est encore dans les premières heures post-mortem. Si le corps est déplacé durant cette période, le schéma de lividité peut changer. La lividité devient « fixe » entre quatre à six heures après le décès et en général douze heures, lorsque les vaisseaux sanguins se ferment, empêchant le sang de se redistribuer. La lividité persiste jusqu'à ce que les vaisseaux se rompent et que les bactéries aident à la dispersion du sang.

Le *rigor mortis*, ou rigidité cadavérique, se manifeste par un raidissement des muscles lié à une absence d'ATP. Cette rigidité est un phénomène temporaire, débutant en moyenne entre deux à six heures post-mortem et atteignant un maximum douze heures après le décès. Elle dure généralement entre 24 et 48 heures, puis diminue à mesure que les substances chimiques musculaires sont consommées, entraînant la dégradation des membranes cellulaires. La durée et l'apparition de la rigidité peuvent être influencées par divers facteurs, notamment la température au moment de la mort et les conditions ambiantes. Une fièvre ou un effort physique intense avant le décès peut accélérer l'apparition de la rigidité en raison de l'accumulation d'acide lactique. À l'inverse, des températures froides peuvent prolonger la rigidité, tandis que des températures élevées peuvent entraîner une décomposition rapide des cellules, empêchant la rigidité de se manifester.

- Stade 3 : Putréfaction

La putréfaction, souvent associée à des changements de couleur, de gonflement et d'odeur, est le stade où les bactéries jouent un rôle clé dans la décomposition du corps. À ce stade, la population microbienne, principalement des bactéries anaérobies, provient généralement du gros intestin ou du sol. Ces bactéries attaquent les cellules du corps, entraînant la décomposition des glucides, des protéines et des graisses.

En décomposition, le sang extravasculaire se décompose et présente diverses couleurs, allant du rouge et violet au brun et noir, en raison de l'accumulation de dioxyde de carbone dans le sang, ce qui entraîne une acidification et une coagulation. De plus, une distension gazeuse apparaît dans la partie supérieure de l'abdomen, due à la fermentation bactérienne. Cela produit des gaz qui, en se mélangeant au sang désoxygéné, modifient la coloration de la peau. Les couleurs résultent également du sulfure d'hydrogène, produit par les bactéries, qui peut créer des teintes vertes, violettes et noires. D'autres gaz comme le dioxyde de carbone ou le méthane peuvent être produits à partir de la décomposition de différents types de tissus et/ou de molécules.(Clark *et al.*, 1997)

Pendant la phase active de croissance bactérienne, des alcools et de l'acétone peuvent se former. La décomposition des protéines libère des acides aminés, ce qui entraîne la libération d'acides organiques. Cette libération peut provoquer une augmentation localisée du pH, pouvant se propager

à tout le corps, transformant un environnement acide en un environnement basique (alcalin) au fur et à mesure de la décomposition.

Ces stades durent en moyenne d'un à trois jours. (Statheropoulos *et al.*, 2011)

b. Stade de gonflement, phase intermédiaire

- Stade 4, 5 et 6

Ces stades correspondent à différentes échelles de gonflement du corps : précoce, modéré et maximal. À mesure que les cellules intestinales se décomposent et se détachent, des trous peuvent apparaître dans la paroi intestinale, permettant aux gaz et aux bactéries de s'échapper dans les cavités thoracique, abdominale et au niveau de la tête. Des bulles ou cloques de gaz peuvent se former sous la peau, apparaissant comme des zones gonflées. Après détachement, cela entraîne le phénomène connu sous le nom de « glissement cutané ». (Clark *et al.*, 1997)

Ces stades durent en moyenne de trois à sept et dix jours. (Statheropoulos *et al.*, 2011)

c. Stade de destruction/décomposition, phase tardive

- Stade 7 : liquéfaction

La liquéfaction des organes les plus vascularisés commence en premier et peut entraîner un écoulement par divers orifices du corps. À mesure que les organes thoraciques et abdominaux se décomposent, ils acquièrent une consistance pâteuse et spongieuse, produisant un liquide sombre et malodorant appelé liquide de purge.

Avec l'accumulation de pression interne et la décomposition des parois musculaires, ce liquide peut être expulsé par le nez, la bouche et le rectum et constitue une riche source de nourriture pour les bactéries et les insectes. La liquéfaction peut survenir en quelques jours, bien que la durée dépende des conditions environnementales. Après cette étape, le corps commence à se décomposer activement et à se dessécher, entraînant une diminution de l'odeur au fur et à mesure de la décomposition. (Clark *et al.*, 1997)

La décomposition active commence entre sept et dix jours et dure environ jusqu'à 20 jours. (Statheropoulos *et al.*, 2011)

- Stade 8 : Squelettisation partielle, momification ou formation d'adipocire

La dernière partie du corps à se décomposer est le système musculo-squelettique. Les os sont maintenus ensemble par des ligaments et du cartilage, qui sont des tissus conjonctifs durs et peu vascularisés, rendant leur décomposition lente. Tant que les ligaments sont intacts, les os restent liés. Au fur et à mesure que le temps passe, la moelle osseuse, qu'elle soit rouge ou jaune, se décompose. Les os peuvent ensuite se dessécher, devenir fragiles et finir par se désagréger, un processus qui varie en fonction de l'âge du défunt et de l'environnement. Lorsqu'un corps commence à se décomposer mais conserve encore des os et du tissu conjonctif, on parle de squelettisation partielle.

Une momification partielle ou complète peut se produire lors de ce stade, dans des situations extrêmement chaudes ou froides. La momification se produit simplement lorsque les tissus s'assèchent lentement par évaporation de liquide.

Enfin, une autre particularité de ce stade est la formation d'adipocire. L'adipocire est une substance qui se forme lorsque la graisse corporelle se décompose dans des conditions spécifiques, notamment dans des environnements humides et à faible teneur en oxygène. Ce processus peut être comparé à la fabrication de savon, où la saponification se produit lorsque des acides gras réagissent avec des alcalins dans un milieu aqueux. Les bactéries anaérobies, telles que *Clostridium perfringens*, jouent un rôle clé dans cette décomposition, produisant des enzymes qui transforment les graisses en acides gras libres dans un environnement favorable. Lorsque ces acides gras se combinent avec des minéraux comme le sodium ou le potassium, ils créent une substance blanchâtre et friable. Si le corps est enterré, ces minéraux peuvent être remplacés par du calcium ou du magnésium, modifiant la texture de l'adipocire. Ce dernier peut envelopper complètement un corps, ralentissant ainsi sa décomposition. Il se forme plus rapidement dans des conditions chaudes et humides, mais cela peut aussi prendre plusieurs semaines. De plus, l'adipocire peut durer plus longtemps dans des corps immergés et peut coexister avec la momification, particulièrement dans les zones couvertes de vêtements. (Clark *et al.*, 1997 ; Schultz, 1997)

Le stade appelé décomposition avancée commence vers le 29^{ème} jour *post-mortem*. La durée de ce stade atteint le 51^{ème} jour de décomposition.

- Stade 9 : Squelette avec ligaments
- Stade 10 : Squelette sans ligament (absence de tissu mou)

Une fois que les os ne sont plus reliés entre eux, le squelette se désarticule et est considéré comme complètement squelettisé.

La squelettisation clôture toute la phase de décomposition et dure du 52^{ème} au 365^{ème} jour *post-mortem*. (Cieśła *et al.*, 2023)

2. Influence des facteurs environnementaux sur le corps

Cette partie examine l'influence de l'environnement sur la décomposition du corps, en présentant les principaux facteurs qui y contribuent. Bien que les conclusions ne soient pas définitives, nous aborderons de manière exhaustive les changements taphonomiques observés lors de variations environnementales. Ces derniers, notamment la température, le type de sol (surtout pour les corps enterrés) et l'eau (pour les corps sur terre et dans l'eau), seront traités dans cette partie.

A. Facteurs environnementaux primaires

Les facteurs environnementaux primaires comprennent la température, la microbiologie et l'entomologie.

a. Température :

Après la mort, l'énergie corporelle se dissipe. La température joue un rôle central : des températures élevées favorisent une décomposition rapide en augmentant l'activité bactérienne et en attirant plus d'insectes, tandis que des températures basses ralentissent ces processus. La température peut se référer à l'air ambiant, au sol, à l'eau, ainsi qu'à la température corporelle et cellulaire. Elle influence également la vitesse des réactions chimiques dans le corps, tant vivant que mort, et détermine la diversité et la quantité d'êtres vivants présents. (Stejskal, 2012)

b. Microbiologie :

Le corps humain est une source majeure de micro-organismes, abritant de nombreuses communautés microbiennes dans le tube digestif et sur la peau. En fonction des températures de l'air et du sol, les micro-organismes présents dans le sol peuvent également contribuer à la décomposition, surtout si le corps est en contact direct avec le sol ou enterré à faible profondeur. La diversité des types de sol et des environnements extérieurs influence le type et la quantité de micro-organismes, ce qui entraîne des variations dans la décomposition. (Metting, 2008)

Certains éléments sont fondamentaux concernant ces micro-organismes. À la mort des cellules, l'oxygène gazeux s'épuise favorisant la prolifération des bactéries anaérobies intestinales, en particulier celles du gros intestin, ainsi que des micro-organismes du sol. Les bactéries commencent rapidement à décomposer les glucides, les protéines et les graisses, entraînant la production et l'accumulation de gaz. (Gill-King, 1997)

c. Entomologie :

L'entomologie médico-criminelle se concentre sur l'étude et l'identification des arthropodes présents sur ou près d'un cadavre pour estimer le temps d'exposition du corps à ces insectes (Haskell *et al.*, 1997). L'objectif n'est pas de déterminer l'heure du décès, mais plutôt de comprendre combien de temps le corps a été exposé aux arthropodes.

Les insectes sont divisés en trois catégories : les insectes à six pattes (comme les mouches), les arachnides à huit pattes (comme les araignées) et les myriapodes (mille-pattes). Ces arthropodes jouent un rôle crucial dans la décomposition et aident à évaluer la durée d'exposition d'un corps dans son environnement.

Les mouches sont les insectes les plus associés à la décomposition. Leur cycle de vie comprend les étapes suivantes : œuf, larve (ou asticot), nymphe et adulte. Les facteurs environnementaux comme la température et l'humidité influencent leur développement. En conditions optimales, les mouches pondent des œufs dans les ouvertures du corps peu après la mort, et les larves se nourrissent de tissus en décomposition. Dans des conditions idéales, les œufs éclosent en quelques heures, et les asticots peuvent décomposer un corps en quelques semaines. Il existe plusieurs types de mouches qui arrivent à différents moments selon les conditions météorologiques et géographiques. Les mouches à viande et les mouches domestiques sont parmi les premières à coloniser un cadavre. (Haskell *et al.*, 1997)

Les coléoptères jouent également un rôle important dans la décomposition. Certains arrivent rapidement et restent jusqu'aux stades avancés, tandis que d'autres viennent plus tard pour se nourrir des larves et des mouches adultes. (Haskell *et al.*, 1997)

De très nombreuses espèces d'insectes comme les fourmis, les cloportes, les araignées, les abeilles, les guêpes ou les papillons jouent aussi un rôle variable en se nourrissant des asticots, de la végétation ou des tissus environnant. Présents à des stades plus ou moins avancés, ces insectes contribuent à la décomposition et à l'évaluation du temps écoulé depuis le décès. (Clément, 2022 ; Stejskal, 2012)

B. Facteurs environnementaux secondaires

Selon la loi de Casper, la vitesse de décomposition dépend de l'exposition du corps à l'air. Un corps exposé à l'air se décompose deux fois plus vite que s'il est immergé dans l'eau et huit fois plus vite que s'il est enterré dans le sol. (Stejskal, 2012)

a. Type de sol

L'emplacement du corps, en particulier le type de sol, est crucial pour la vitesse et les étapes de la décomposition. Bien que l'étude du sol soit complexe, certaines notions de base peuvent aider à comprendre son rôle. Le sol est composé de particules minérales et de matières organiques ayant des propriétés biologiques, chimiques et physiques qui évoluent avec le temps (Fitzpatrick, 2008). Pour les taphonomistes, il influence l'état de décomposition et la capacité à localiser un corps pour les maîtres-chiens.

Il est important de reconnaître que tous les sols sont différents, influencés par des facteurs tels que l'emplacement, le climat, et les organismes présents. De plus, le sol change au fil du temps, que ce soit par des processus naturels ou par des interventions humaines comme le labourage. Les variations de sol peuvent également affecter les couches, la texture, la porosité, et la concentration microbienne, tous des éléments clés dans l'étude de la décomposition.

Le sol se divise principalement en deux couches : la couche arable et le sous-sol. La couche arable, qui s'étend généralement sur 30 à 46 cm de profondeur, est modifiée par des activités telles que la plantation, le labourage et l'application de produits chimiques. En revanche, le sous-sol se trouve en dessous de cette couche et reste généralement inchangé.

Les sols varient également en fonction de la taille des particules minérales, ce qui influence leur porosité. Plus les particules sont grosses, plus il y a d'espace entre elles, ce qui affecte la rétention et le mouvement de l'eau à travers le sol. L'eau peut se déplacer par divers mécanismes, y compris le ruissellement, l'infiltration et le drainage. La taille des particules, qui se classent comme suit : le sable (2 à 0,02 mm), le limon (0,02 à 0,0002 mm) et l'argile (< 0,0002 mm). Les sols peuvent être décrits par leurs textures, comme le sable, le loam sableux, le loam, le loam argileux, l'argile légère, l'argile moyennement lourde et l'argile lourde.

La consistance du sol décrit sa capacité à maintenir sa forme lorsqu'on le presse. Selon le type de sol et sa teneur en eau, il peut être meuble, mou, ferme ou rigide.

Le sol varie également par la diversité de sa population microbienne, qui peut changer en cas de perturbation, comme le creusement. De plus, le sol contient des enzymes libérées par les plantes ou les microbes, influençant les réactions chimiques de manière localisée. (Metting, 2008)

Ainsi, d'après ces éléments et comme a pu le démontrer Alexander et al., la texture du sol peut affecter l'échappement des gaz de décomposition et donc l'efficacité des chiens de RRH. Six chiens accrédités au niveau national ont été évalués sur des restes humains enterrés dans des sols différents, un sol argileux et un sol sableux. Le temps de recherche et la précision ont été comparés pour le sol argileux et le sol sableux afin d'évaluer la difficulté de localisation des odeurs. Le sol sableux a donné des temps de réponse significativement plus rapides, mais aucune différence significative n'a été constatée dans la précision des performances entre les textures du sol ou la méthode d'entraînement. Les résultats indiquent donc que la texture du sol peut être un facteur important dans la difficulté de détection des odeurs. Ainsi, une connaissance préalable de la texture

et de l'humidité du sol peut être utile pour la gestion et la planification de la recherche. (Alexander *et al.*, 2016)

b. Enterrement

L'enterrement d'un corps ralentit le processus de décomposition. Ce ralentissement dépend de divers facteurs, tels que la température, la densité et la profondeur du sol. Dans les premiers centimètres de la couche supérieure, la température est similaire à celle de l'air ambiant, permettant aux odeurs corporelles d'atteindre la surface et d'attirer les arthropodes, comme les mouches qui pondent des œufs. Si le sol est peu compact, les asticots peuvent accéder au corps pour faciliter la décomposition. À des profondeurs moyennes d'environ 60 cm, la température est plus fraîche, ce qui peut diminuer l'activité microbienne. Toutefois, les microbes du sol et les nématodes peuvent contribuer à la décomposition, et des observations montrent que certaines mouches peuvent descendre jusqu'à 60 cm pour atteindre des restes enterrés. Des enterrements plus profonds peuvent également favoriser la formation d'adipocire, en raison de conditions d'oxygène plus faibles et d'une humidité accrue. (Stejskal, 2012)

La masse microbienne du sol représente environ 1 à 3 % de la matière organique totale, et une plus grande concentration de micro-organisme favorise une décomposition plus rapide. Cette décomposition peut acidifier le sol environnant, ce qui agit comme un engrais et stimule la croissance des plantes. (Brookes, 2008)

Une étude menée par Wilson *et al.* au Royaume-Uni a comparé la décomposition de porcs enterrés dans différents types de sols (pâturages, landes et bois de feuillus). Les résultats ont démontré que le type de sol avait un impact significatif sur l'état des corps, même à proximité. La décomposition a entraîné des modifications du sol, notamment des changements dans le pH, la population microbienne, l'humidité et les niveaux d'oxygène. (Wilson *et al.*, 2007)

Les charognards jouent un rôle majeur dans la décomposition des carcasses. Selon une étude, ils peuvent consommer entre 35 et 75 % des restes dans les écosystèmes terrestres, voire plus en l'absence de microbes en hiver (Fitzpatrick, 2008). Le type de charognard dépend de la région : les rongeurs rongent souvent les os desséchés et les emportent dans leurs nids, tandis que les carnivores (renards, coyotes) dévorent les tissus mous, en particulier le visage, les mains et les pieds, dispersant souvent des parties du corps sur une large zone (Haglund, 1997). Les vautours, bien que connus pour leur rôle de charognards, ne sont pas les seuls oiseaux impliqués ; de plus petits oiseaux volent des poils et des vêtements pour construire leurs nids. D'autres animaux comme les ours, les cochons et même les animaux domestiques peuvent contribuer au démembrement des corps. En milieu aquatique, des espèces comme les crustacés et les tortues s'attaquent aux corps submergés (Galloway, 1997).

c. Conditions extrêmes

- **Désert :**

Dans le désert, les conditions chaudes et sèches influencent fortement la décomposition des corps, bien que des périodes de froid et de pluie puissent aussi survenir. En milieu aride, le corps peut se dessécher rapidement. Ensuite, la momification partielle ou complète commence, généralement 11 à 30 jours après la mort. La peau s'assèche et les tissus se décomposent plus lentement en raison de la réduction des gaz et d'une baisse de l'activité des insectes. En intérieur, les corps se gonflent

quelques jours après la mort et progressent vers la squelettisation après la perte de liquide. (Galloway, 1997)

- **Incendie :**

Lorsqu'un corps est exposé à une chaleur extrême, plusieurs réactions se produisent. L'une des plus fréquentes est celle où les muscles se contractent. Si l'exposition au feu continue, les tissus mous se consomment, ne laissant que les os. À des températures de 150 à 300 °C, la matrice organique des os se dégrade, bien que l'ADN puisse encore être récupéré jusqu'à 300 °C. Au fur et à mesure que la température augmente (300 à 600 °C), la couleur des os change, passant du brun au noir, puis au gris et au blanc. Si les os sont exposés à une chaleur encore plus intense, ils se dessèchent jusqu'à un état de calcination, où la structure organique disparaît totalement, laissant les os avec une texture de porcelaine, signe de la fusion des sels osseux. (Haglund *et al.*, 1997 ; Harbeck *et al.*, 2011)

- **Congélation et décongélation :**

Dans des climats très froids, comme à haute altitude, les corps se conservent davantage par dessiccation que par congélation. Lorsque la température descend en dessous de 0 °C, le corps gèle au lieu de se dessécher. Si les températures varient, le corps peut geler et décongeler à plusieurs reprises. En hiver, l'air sec peut entraîner une momification partielle de la peau exposée. En dessous de 12°C, la multiplication des bactéries ralentit considérablement, et entre 0 et 5°C, elle cesse presque totalement. En temps normal, les bactéries intestinales amorcent la décomposition de l'intérieur vers l'extérieur. Cependant, lorsque le corps est congelé, la décomposition commence de l'extérieur vers l'intérieur, car les bactéries intestinales ne sont plus actives. Les microbes du sol, une fois décongelés, jouent alors un rôle crucial dans ce processus. Dans des conditions modérément froides, des bactéries intestinales peuvent subsister à l'intérieur du corps jusqu'au redoux, où elles relancent le processus de putréfaction, décomposant le corps de l'intérieur vers l'extérieur. En cas de gel puis dégel, les mouvements du sol peuvent provoquer un déplacement du squelette et se retrouver à différentes profondeurs ou bien remonter à la surface. (Miccozzi, 1997)

- **Eau :**

La noyade est définie comme un décès causé par une immersion dans l'eau. Le processus commence par l'immersion, souvent suivie de panique et d'un échec à la nage, conduisant à une hypothermie par immersion et à un effondrement post-immersion. Après la noyade, le corps coule et subit une décomposition progressive. Les gaz produits lors de la putréfaction peuvent faire remonter le corps à la surface. Les signes habituels de mort, tels que la rigidité cadavérique, la lividité et la baisse de température corporelle, se manifestent également chez les victimes de noyade. (Erskine et Armstrong, 2021)

Plusieurs facteurs influencent la capacité d'un corps à flotter après une noyade. La température de l'eau est déterminante : dans l'eau plus chaude que 3,3 °C, les bactéries commencent à produire des gaz qui permettent au corps de flotter. Dans l'eau froide, les gaz s'échappent plus rapidement, ce qui peut limiter cette flottabilité. Le pourcentage de graisse corporelle et l'état de santé de la victime peuvent aussi accélérer la décomposition et favoriser la formation de gaz. D'autres facteurs, comme le type de vêtements, la présence de courants ou d'obstacles, et la manière dont la victime est entrée dans l'eau, peuvent également affecter le processus de flottation et de décomposition. (Erskine et Armstrong, 2021)

La distance qu'un corps peut parcourir dans l'eau dépend de plusieurs facteurs comme le type de courant, la vitesse du courant, la profondeur totale ou la présence de blessures. (Erskine et Armstrong, 2021)

Ces caractéristiques mettent donc en lumière l'importance de prendre en compte les spécificités environnementales et les conditions météorologiques pour comprendre les variations taphonomiques.

3. Le profil olfactif des cadavres humains

Selon la littérature actuelle, il n'existe pas de consensus scientifique sur le profil chimique précis des restes humains. On pense que les composés chimiques détectés lors de la décomposition font partie de cette signature chimique, qui pourrait résulter de la dégradation des tissus et/ou de sous-produits microbiens. Ces composés chimiques peuvent également être modifiés par les conditions environnementales. Il reste une question encore non élucidée à l'heure actuelle : sur quoi les chiens spécialisés dans la détection des restes humains se focalisent-ils réellement ?

Pour rappel, la décomposition est un processus naturel par lequel des organismes de grande taille se réduisent en plus petites parties. Ce processus est fortement influencé par les insectes, les bactéries et d'autres micro-organismes. A l'image des vaches, les colonies de bactéries du système digestif permettent la décomposition de l'herbe qu'elles consomment. Ce processus de digestion génère des gaz et décompose les aliments en nutriments assimilables.

La chimie des restes humains est essentielle pour comprendre le processus de décomposition. Voici quelques concepts clés à retenir. Différentes familles de molécules chimiques sont associées aux restes humains comme les alcanes (hydrocarbures saturés), les alcènes (hydrocarbures insaturés), les alcynes (avec triple liaisons), les acides organiques, les alcools, et les composés aromatiques. En théorie, tous les composés organiques peuvent se décomposer en eau (H₂O) et dioxyde de carbone (CO₂), un processus appelé minéralisation. La structure d'un composé (saturée ou insaturée, cyclique ou linéaire) influence sa dégradabilité et sa capacité à se disperser dans l'environnement. Enfin, la volatilité décrit la capacité d'un composé à s'évaporer facilement. Un composé organique volatil a donc la propriété de s'évaporer rapidement. Ces concepts sont cruciaux pour comprendre la nature chimique des odeurs associées aux restes humains et comment elles se dispersent.

A. Identification des composés organiques volatils (COV)

Chaque individu possède une odeur unique, influencée par des facteurs génétiques et environnementaux. Cette odeur est créée par des éléments internes, les facteurs primaires, qui demeurent constants, ainsi que par l'alimentation, facteurs secondaires, et des produits appliqués sur la peau, facteurs tertiaires (Curran *et al.*, 2010). Les bactéries présentes sur la peau jouent également un rôle clé dans cette odeur. La transition entre la vie et la mort s'accompagne d'un changement des composés organiques volatils (COV) émis par le corps. Les mouches, par exemple, peuvent apparaître rapidement après la mort, signalant une modification de l'odeur corporelle due à la décomposition. À ce stade, il est important de considérer comment les différentes cellules du corps se décomposent en produits chimiques contribuant à l'odeur de décomposition.

Le volatilome se réfère à l'ensemble des composés organiques volatils (COV) dans un organisme. Ces COV peuvent être utilisés pour détecter des maladies et des agents pathogènes, et l'odorat des chiens est suffisamment sensible pour percevoir ces composés à des concentrations très faibles (Kokocińska-Kusiak *et al.*, 2021). Les substances odorantes qui intéressent souvent les chiens sont des composés organiques volatils, généralement de poids moléculaire entre 50 et 500 g/mol. Cependant, la sensibilité des chiens varie, rendant la détection de certains composés moins prévisible (Goss, 2019). Par exemple, Aksenov *et al.* (2016) ont montré que les allèles de l'antigène leucocytaire humain (HLA) influencent directement la production de certains composés volatils à l'échelle cellulaire. L'expression de séquences HLA spécifiques détermine ainsi une "empreinte olfactive" unique, formée par des changements métaboliques intracellulaires. (Aksenov *et al.*, 2012)

L'analyse actuelle des COV nécessite une instrumentation chimique analytique stationnaire sophistiquée, telle que la chromatographie liquide/gazeuse-spectrométrie de masse. Ces instruments sont précieux pour la découverte de COV biologiques et pour identifier des COV spécifiques, mais contrairement aux chiens, les instruments sont généralement confinés dans un laboratoire, incapables de détecter les COV en temps réel et n'ont pas la capacité de suivre l'odeur jusqu'à sa source. (Angle *et al.*, 2016)

Après la mort, le corps se décompose et produit divers COV, avec plus de 478 composés identifiés jusqu'à présent (Annexe 1). Le profil olfactif associé à la décomposition varie dans le temps selon les phases de décomposition. Les composés sont libérés, parfois en continu et parfois à une seule étape du processus de décomposition. Ainsi, chaque étape de décomposition est caractérisée par une odeur spécifique. Le stade frais et le stade des restes secs sont généralement associés à moins de molécules que les stades gonflés et de décomposition active. (Figure 28 et 29) et est influencé par plusieurs facteurs, rendant la détection complexe. Actuellement, aucune odeur chimique spécifique n'a été constamment identifiée durant la décomposition, rendant nécessaire l'exposition des chiens de recherche de restes humains à une variété de matériels de dressage différents. (DeGreeff et Schultz, 2022)

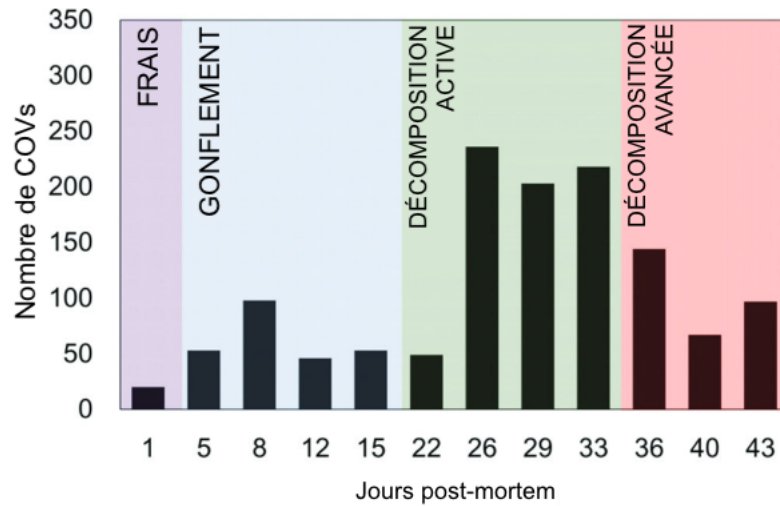


Figure 28 : Évolution du nombre de composés organiques volatils détectés dans une carcasse de porc en fonction du stade de décomposition et du temps post-mortem (d'après Verheggen *et al.*, 2017)

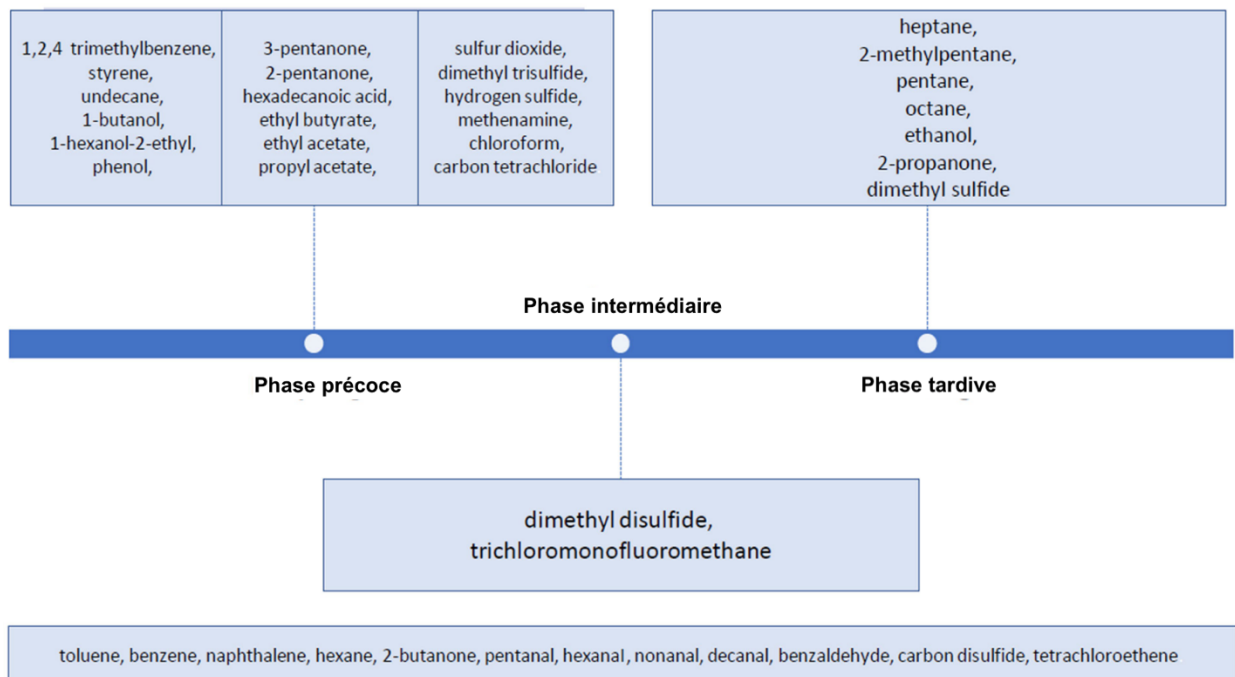


Figure 29 : Caractéristiques des COV sécrétés durant les différentes phases de décomposition d'un corps humain (d'après Cieśła *et al.*, 2023)

a. Gaz

Comme nous l'avons vu précédemment, lors de la décomposition, les micro-organismes produisent divers gaz comme le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, le méthane, le dioxyde de soufre et l'hydrogène.

Les chercheurs ont donc recueilli des échantillons d'air provenant de différents tissus, conservés dans différentes situations et provenant de tissus de différentes espèces. De manière simplifiée, ils ont filtré cet air et identifié les différents éléments qui s'y trouvaient ainsi que leur quantité.

b. Biomolécules principales

Les glucides sont des composés essentiels pour les plantes et les animaux, présent principalement sous forme de glucose chez les animaux. Dans des conditions aérobies, ils peuvent se décomposer en acides organiques (acides citrique, oxalique ou glucuronique) ou en alcools puis ces derniers peuvent éventuellement se décomposer en CO₂ et H₂O. Les glucides peuvent également se décomposer en aldéhydes, cétones, esters d'acides et éthers. Dans des conditions anaérobies, des acides acétique, butyrique et lactique peuvent se former avec des alcools (éthanol et butanol) et des gaz (hydrogène, composés soufrés et méthane). (Forbes, 2008)

Les protéines sont constituées de chaînes d'acides aminés, elles remplissent diverses fonctions dans le corps. Les protéines se décomposent par l'action d'enzymes appelées protéases, aboutissant à des acides aminés et à d'autres sous-produits (Forbes, 2008). Ces enzymes peuvent être produites par les bactéries elles-mêmes (DeGreeff, 2010). Ces enzymes peuvent extraire des groupes fonctionnels contenant de l'azote (désamination), un groupement carboxyle (décarboxylation), du sulfate (désulfhydratation) et, éventuellement, de l'ammoniac, ce qui entraîne la libération de ce que l'on appelle des amines biogènes, liés à l'odeur de décomposition. Deux acides aminés associés aux restes humains sont le scatole et/ou l'indole (Hoffman *et al.*, 2009). La décomposition des protéines peut également produire des composés comme la putrescine et la cadavérine, des composés organiques volatils associés à la décomposition. (Forbes, 2008)

c. Tissus spécifiques

- Le sang :

Il existe une grande variabilité des produits trouvés par la décomposition de différents types de sang humain (Hoffman *et al.*, 2009).

- L'os :

L'os est composé de parties organiques et inorganiques, le calcium et le phosphore formant la partie inorganique autour d'une matrice organique, principalement constituée de collagène.

Chez les jeunes, les os se forment à partir d'une structure cartilagineuse, grandissant en longueur à partir de divers centres de croissance. Leurs rythmes de maturation varient, mais en général, le calcium remplit progressivement la structure de collagène. Les os se distinguent également par leur densité : l'os cortical, dense, entoure la cavité médullaire, tandis que l'os trabéculaire, plus léger, présente une apparence spongieuse avec de nombreux espaces aérés. Lors de la décomposition osseuse, le collagène se dégrade avant les minéraux. La moelle osseuse se décompose en premier, conférant à l'os une teinte brunâtre et grasse, avant qu'il ne se dessèche.

Hoffman *et al.* ont analysé trois échantillons d'os humains et trouvé plusieurs composés organiques volatils (COV), tels que des aldéhydes, des alcools, des hydrocarbures aromatiques et des sulfures. (Hoffman *et al.*, 2009). Vass *et al.* ont identifié 72 composés chimiques spécifiques aux os, dont certains étaient cruciaux pour différencier les os humains de ceux d'autres espèces. (Vass *et al.*, 2008). De plus, cette étude a révélé des variations dans les profils chimiques. Ces différences sont essentielles pour les maîtres-chiens spécialisés dans la détection de cadavres.

d. Lipides et tissus adipeux

Les tissus adipeux ou graisses se composent de cellules à paroi mince contenant des réserves de lipides. Les triglycérides, formés par la combinaison de glycérol et d'acides gras, représentent 90 à 99 % des lipides et constituent 60 à 85 % de la graisse corporelle (Forbes, 2008). La consistance des tissus adipeux varie selon leur saturation : les graisses saturées, riches en hydrogène, sont solides à température ambiante, tandis que les huiles, d'origine végétale, sont liquides.

Les lipides peuvent comporter des groupes fonctionnels, comme la phosphatidylamine, qui est une combinaison de lipides et de protéines. Les phospholipides, essentiels à la structure des membranes cellulaires, forment une bicouche en raison de leur nature hydrophile et lipophile.

Les tissus adipeux sont décomposés par des enzymes appelées lipases, qui hydrolysent les triglycérides en acides gras et en glycérol. Ce processus de dégradation peut produire divers composés chimiques tels que des esters d'acides, des alcools, des aldéhydes, des cétones et des sulfures. Les acides gras volatils peuvent également se former et se décomposer en composés phénoliques.

Les acides gras les plus fréquemment associés aux corps humains décédés incluent l'acide oléique, l'acide linoléique, et en moindre quantité, l'acide palmitoléique et l'acide palmitique (Forbes, 2008).

B. Variations individuelles de COV

Nous ignorons beaucoup de choses sur les spécificités du profil chimique des restes humains, mais nous savons qu'il existe des variations dans ce profil. Il varie selon que la personne soit vivante ou décédée (Figure 30), selon le stade de décomposition (Figure 31), et selon l'environnement dans lequel le défunt est exposé. Une thèse de doctorat de DeGreeff a fourni un résumé graphique de certaines de ces différences. Il existe un certain nombre de composés similaires entre les échantillons humains vivants et décédés. Mais certaines différences semblent importantes à noter. Les échantillons décédés contiennent une plus grande variété de composés que les échantillons humains vivants individuels. Les échantillons d'odeurs d'humains vivants contiennent tous de l'acétone de géranyle, molécule qui n'est présente dans aucun des échantillons de restes humains. (DeGreeff, 2010).

Composés volatils collectés auprès d'humains vivants et de restes humains

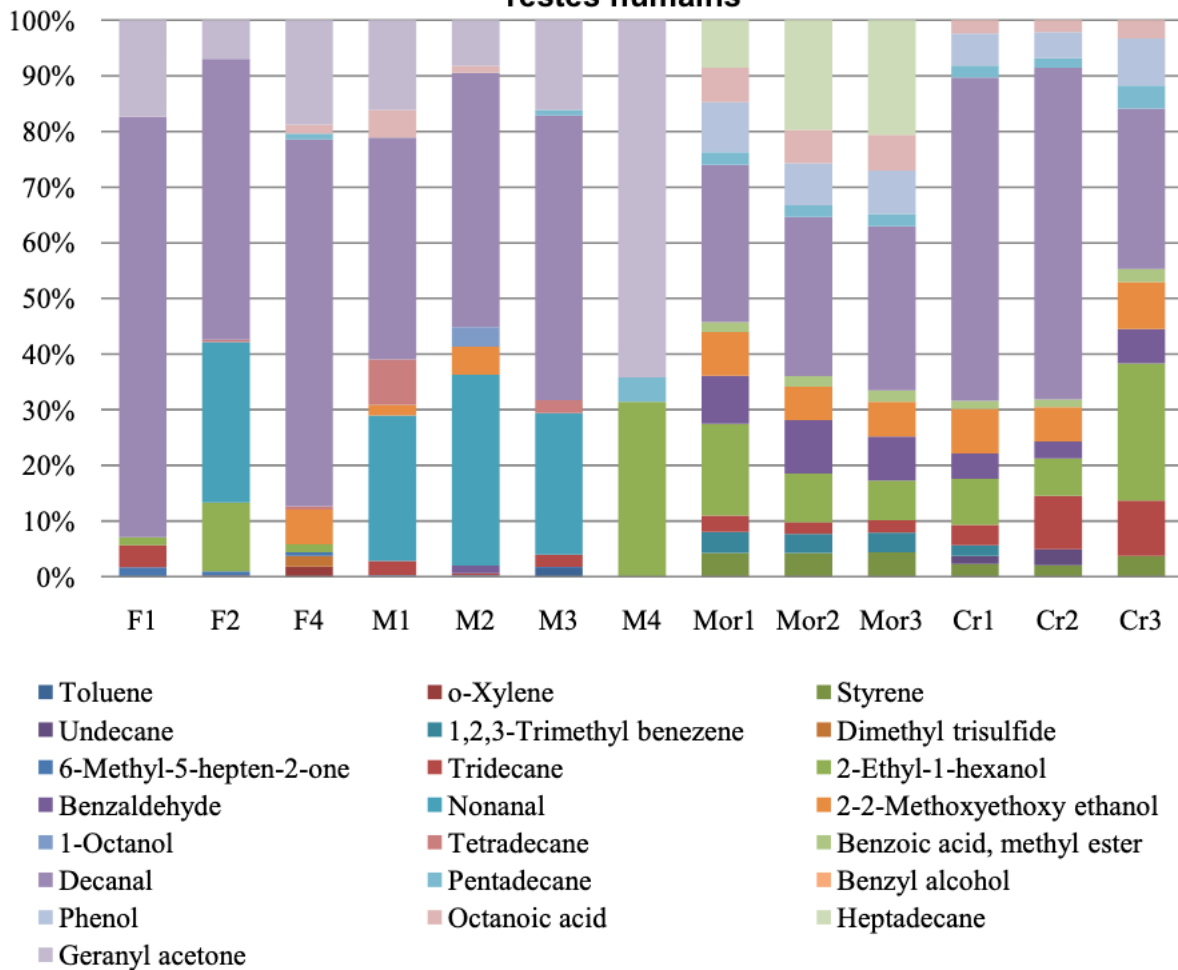


Figure 30: COV collectés auprès d'humains vivants et de restes humains (d'après DeGreeff, 2010)

Les lettres F et M indiquent les sujets féminins et masculins de l'étude sur les humains vivants. Mor et Cr indiquent des échantillons de restes humains sélectionnés au hasard à la morgue et au crématorium, respectivement.

Chaque phase de décomposition a sa propre signature olfactive (Clases *et al.*, 2021), et des tentatives de classification des COV en trois stades (précoce, moyen, tardif) sont proposées (Vass, 2012). Il est difficile d'identifier avec précision les COV à chaque stade de décomposition, car divers facteurs peuvent influencer la production chimique. Les données accumulées sont utiles pour établir des délais pour les composés (Vass *et al.*, 2008). Il existe des biomarqueurs potentiels de décomposition humaine, mais davantage de recherches sont requises pour établir un consensus sur les COV responsables de l'attraction canine. (Armstrong *et al.*, 2016 ; Clases *et al.*, 2021 ; Hoffman *et al.*, 2009)

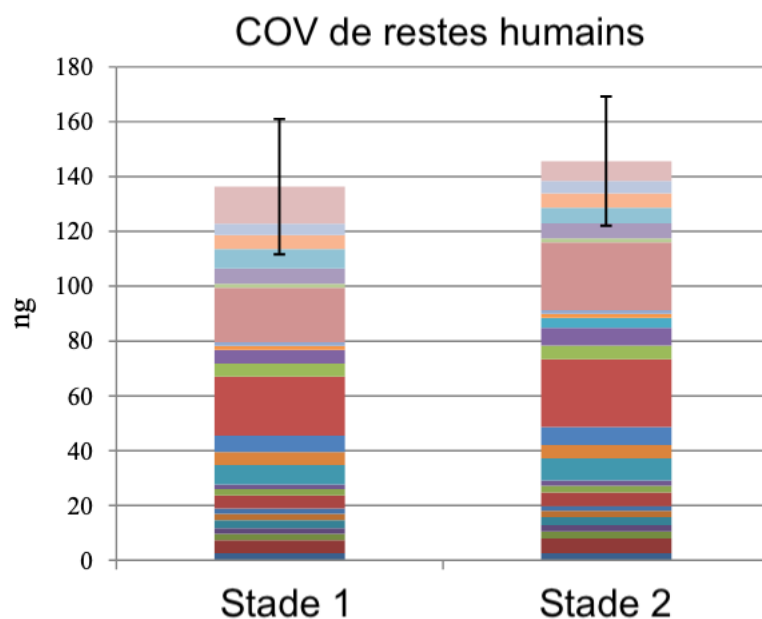


Figure 31 : Profils olfactifs recueillis à partir de restes humains en phase de décomposition 1 et 2 (d'après DeGreeff, 2010)

Enfin, il peut être intéressant de noter les différences entre espèces (Figure 32). Il existe ainsi une similitude dans la nature des composés mais une disparité dans les quantités de chacun d'entre eux entre différentes espèces en décomposition comparativement à des restes humains (DeGreeff, 2010).

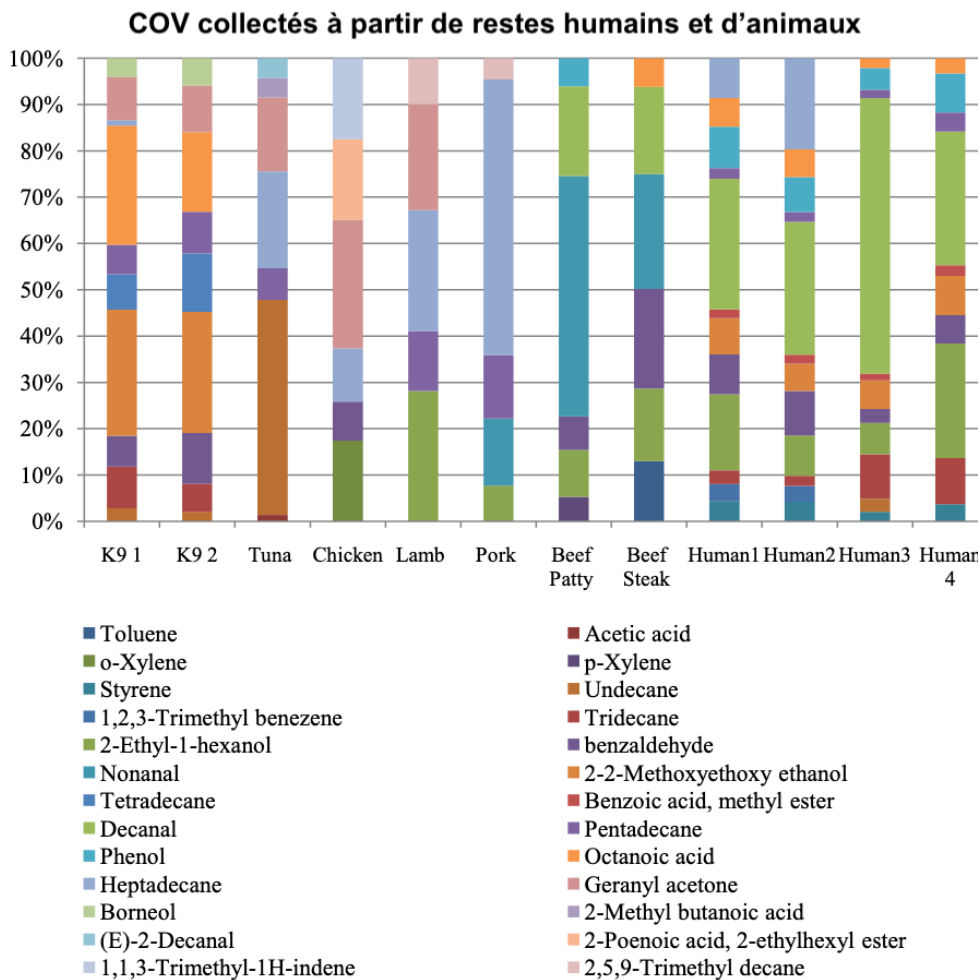


Figure 32 : Profils olfactifs collectés à partir de restes d'animaux et d'humains (d'après DeGreeff, 2010)

Voici les correspondances d'espèces : K9 = restes canins, Tuna = restes de thon, Chicken = restes de poulet, Lamb = restes d'agneau, Pork = restes de porc, Beef Patty et Beef Steak = Bœuf

C. Exemples de facteurs environnementaux influençant les COV

Comme nous avons pu le voir précédemment, l'état de décomposition d'un cadavre influence les composés organiques volatils (COV) qu'il libère, mais d'autres facteurs environnementaux jouent également un rôle. Dekeirsschieter et al. (2009) ont montré que des porcelets en décomposition dans différents biotopes (champ, forêt, milieu urbain) émettent des COV variés en raison de la composition du sol, de la végétation et des communautés microbiennes. Dans les milieux urbains, l'accès limité à la faune nécrophage et la présence de polluants peuvent retarder la décomposition et altérer le profil des COV. (Dekeirsschieter *et al.*, 2009)

L'environnement, ouvert ou fermé, est crucial : bien que les COV soient similaires au début, des différences apparaissent à un stade avancé. Plus de 400 COV sont trouvés dans le sol des cadavres enterrés, souvent en plus grande quantité que dans l'air. Le sol agit comme un réservoir pour ces COV, retenant certaines substances durant la décomposition. (Forbes et Perrault, 2014 ; Vass, 2012)

Les variations de températures influencent également la décomposition : des températures froides créent une odeur persistante, tandis que des températures plus chaudes augmentent la volatilité des COV et attirent plus d'animaux nécrophages. Forbes et al. (2014) ont noté que les composés sulfurés prédominent en été, et les changements saisonniers dans l'activité des insectes et des microbes affectent également le profil des COV (Dekeirsschieter *et al.*, 2009 ; Forbes et Perrault, 2014). Knobel et al. ont ainsi pu démontrer des modifications d'émissions de COV chez les porcs et l'Homme entre l'été et l'hiver (Figure 33).

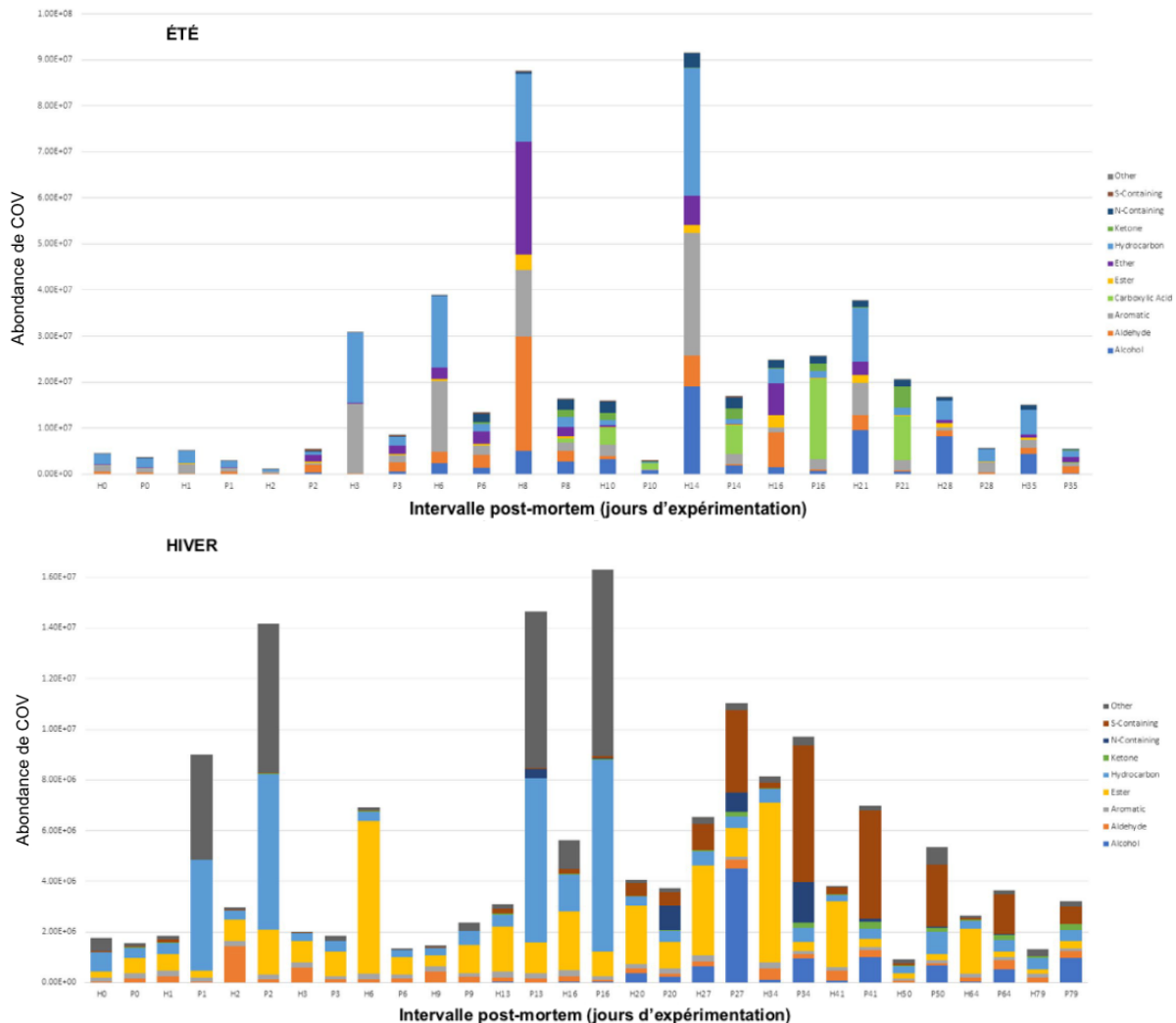


Figure 33 : Classes de COV, en été et en hiver, échantillonnées à partir de restes humains (H) et porcins (P) (d'après Knobel *et al.*, 2019)

D'autres facteurs influençant le taux de décomposition incluent des substances chimiques répulsives, la dispersion des signaux olfactifs par le vent, et des variables liées au cadavre lui-même (taille et cause du décès) par exemple. (Verheggen *et al.*, 2017)

D. Exemples de facteurs individuels influençant les COV

- **Age et sexe :**

La taille et l'âge du défunt influencent la décomposition. Les os des nourrissons et des jeunes enfants, moins calcifiés, se décomposent plus rapidement que ceux des adultes. Les corps plus petits, contenant plus de graisse et d'humidité, favorisent la formation d'adipocire. Ils sont aussi plus

vulnérables aux attaques et à la dispersion par les charognards et les prédateurs. (Morton et Lord, 2006)

Pourtant, une étude a pu démontrer par l'analyse des COVs produits durant les premiers stades de décomposition que ni l'âge, ni la taille, ni le sexe, ni l'IMC n'ont d'impact sur le volatilome au stade frais. (Clément, 2022)

- **Vêtements :**

L'étude de Kelly, Van der Linde et Anderson a examiné l'impact des vêtements et de l'enveloppement sur la décomposition et l'infestation d'arthropodes. Huit porcs ont été placés à l'extérieur, certains en été, d'autres en automne, avec des vêtements (t-shirt, short), enveloppés dans des draps ou les deux, tandis qu'un porc restait exposé sans protection. En été, les asticots sont apparus dès le premier jour, et la décomposition s'est faite de manière similaire sur les différents porcs. Les porcs d'automne ont attiré plus de mouches que ceux d'été, avec des asticots se développant sous les draps. Le ballonnement a duré moins longtemps en été. Chez les porcs enveloppés, la décomposition a été plus lente, mais ils ont finalement perdu plus de masse en raison d'une putréfaction accrue (Kelly *et al.*, 2009). En général, les matériaux synthétiques se dégradent plus lentement que les fibres naturelles comme le coton et la laine. (Janaway, 2008). Le fait d'envelopper un corps dans des vêtements ralentit donc la décomposition en réduisant le contact avec les microbes du sol, favorisant ainsi une humidité plus élevée et une faible teneur en oxygène, conditions propices à la formation d'adipocire.

4. Localisation du corps

Dans la plupart des cas, l'odeur d'une cible n'est pas composée d'un seul composant, mais d'un ensemble de substances odorantes formant ce qu'on appelle un profil olfactif. Par exemple, l'odeur d'un cadavre est le résultat de centaines de composés volatils et semi-volatils qui, ensemble, créent un profil distinct que les chiens entraînés à la détection des restes humains peuvent reconnaître. Pour des profils olfactifs complexes, comme ceux d'un corps vivant ou d'un cadavre, il est difficile de déterminer les composés spécifiques que le chien utilise pour la détection ou si des odeurs étrangères, dues à la contamination, ont altéré le profil. (Lazarowski *et al.*, 2020)

A. Source odorante

Lorsqu'une source d'odeur est présente, celle-ci se diffuse dans l'air et se fixe sur les matériaux environnants jusqu'à atteindre un équilibre de répartition. Une fois la source retirée, ces matériaux peuvent continuer à libérer des odeurs détectables par les chiens. La vitesse de cette libération varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de matériau et son interaction avec les COV. Par exemple, les plastiques peuvent stocker de grandes quantités d'odeurs, tandis que des matériaux comme le verre en stockent peu. (Goss, 2019)

Lorsque l'air est stagnant et immobile, l'odeur a tendance à s'accumuler au-dessus et tout autour des restes en décomposition, formant ainsi une réserve olfactive primaire (Figure 34). Les molécules odorantes sont progressivement libérées dans l'air et absorbées par le sol dans toutes les directions autour du corps.



Figure 34 : Réserve olfactive primaire (d'après Rebmann et David, 2000)

Le mouvement d'air homogène et directionnel éloigne les molécules odorantes de la source, formant un gradient en forme de cône de concentration décroissante et de dispersion croissante (Figure 35). Le sommet du cône est situé à la source du cadavre où se trouve la plus grande concentration odorante. L'axe longitudinal du cône odorant horizontal s'étend latéralement à l'écart des restes dans la direction du vent.

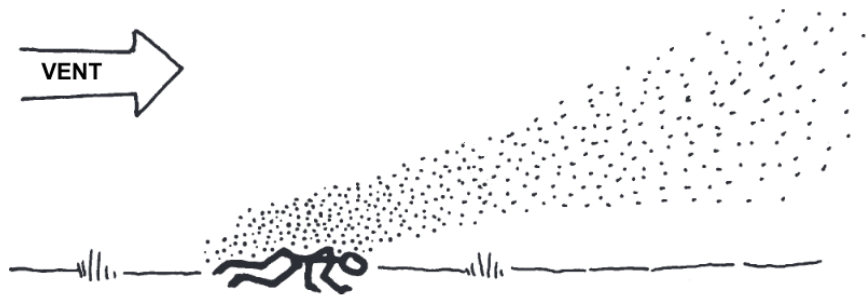


Figure 35 : Cône d'odeur horizontal dû au vent (d'après Rebmann et David, 2000)

En l'absence de vent détectable, les courants d'air dus à la montée de la chaleur peuvent provoquer une montée de l'odeur dans l'air au-dessus du corps, formant un cône odorant vertical dans lequel l'odeur ne parvient pas à se disperser largement autour du corps (Figure 36).

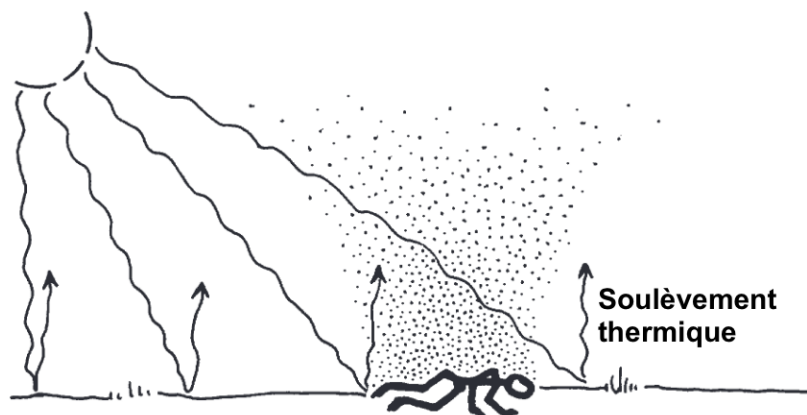


Figure 36 : Cône odorant vertical dû à l'élévation thermique (d'après Rebmann et David, 2000)

B. Diffusion des effluves humaines

En présence d'une source odorante (restes humains), il y a une formation d'un cône odorant primaire, comme une flaque autour du cadavre, avec dispersion des molécules dans l'air et le sol dans toutes les directions (Figure 37). L'air chaud monte, entraînant avec lui les molécules odorantes de façon verticale. Le vent éloignera l'odeur du cône odorant primaire qui suivra alors la direction du vent pour former un cône odorant horizontal. Plus le vent est fort, plus le cône sera étroit.

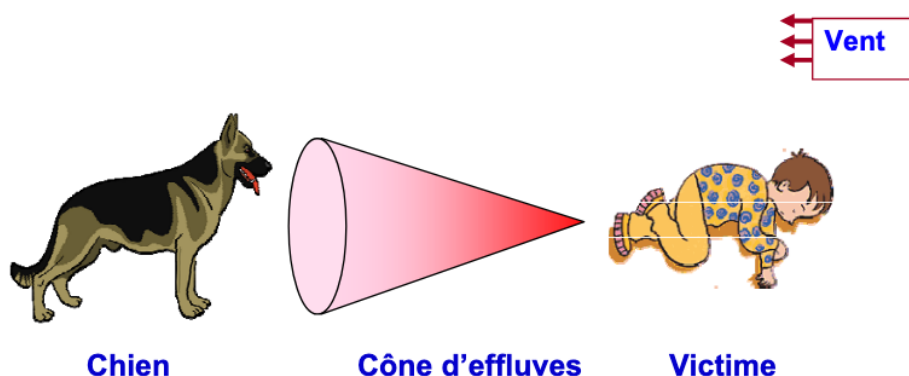


Figure 37 : Dissémination des odeurs depuis une source odorante fixe (d'après Demuliere, 2008)

Des variations du vent peuvent créer des vides ou des interruptions dans la diffusion des odeurs, rendant certaines zones difficiles à détecter. Les odeurs peuvent être transportées par des conduits créés par l'eau, modifiant la dispersion en fonction des courants ou du ruissellement et empêchant l'absorption de molécules odorantes près des restes (Figure 42 et 43). Enfin, des éléments comme des bâtiments ou des collines peuvent bloquer ou rediriger les courants d'air, entraînant la formation de bassins olfactifs secondaires et potentiellement de nouveaux cônes olfactifs secondaires à distance des restes (Figure 38).

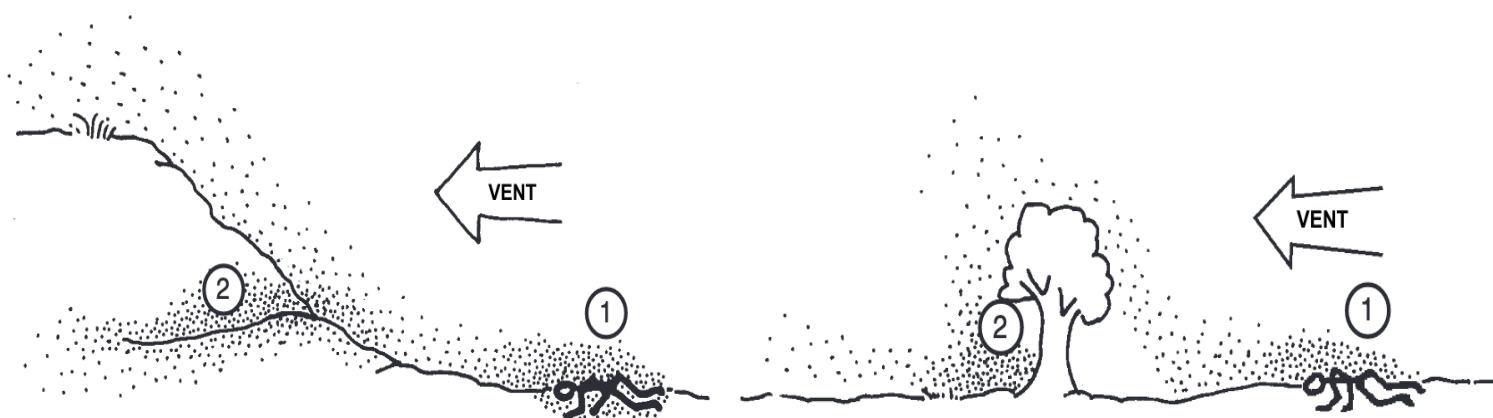


Figure 38 : Bassins/cônes olfactifs primaires et secondaires dus aux barrières/végétations du terrain (d'après Rebmman et David, 2000)

Par exemple, selon différents concepts météorologiques comme la pression atmosphérique dépendant de la densité et de la température atmosphérique ainsi que les différents types de transferts de chaleur liés à l'exposition aux rayons solaires, on peut conclure que lors d'une journée fraîche, l'odeur sera proche du corps et, à mesure que la journée se réchauffe, l'air contenant les produits chimiques volatils rayonnera vers le haut et vers l'extérieur. Ensuite, à mesure que l'air se refroidit, l'odeur peut se déposer loin de la victime, créant ainsi une large réserve d'odeurs dispersées, en fonction des différents flux d'airs présents. (Rebmann et David, 2000)

C. Particularités environnementales

Les conséquences des particularités environnementales pour la détection canine sont diverses. Tout d'abord l'odeur des restes humains est un mélange complexe de produits chimiques, dont certains peuvent se volatiliser, se fixer au sol ou être transportés dans l'eau. Les conditions environnementales influencent la manière dont ces produits chimiques sont présents et détectés par les chiens de recherches de restes humains (Annexe 3). Cela montre la complexité de la dispersion des odeurs, autant que celle du processus de décomposition. Ces connaissances permettent de mieux comprendre le travail des chiens de détection de recherches de restes humains.

D'après *The Cadaver Dog Handbook* (Rebmann et David, 2000), les conditions environnementales, telles que la météo et la topographie, influencent la dispersion des odeurs de décomposition, rendant plus complexe la détection par les chiens formés à retrouver des restes humains.

a. Topographie et vent :

Le vent se déplace plus rapidement sur des surfaces planes et ralentit dans des zones accidentées (collines, bâtiments, végétation). Les variations locales de température, comme entre terre et mer, génèrent des brises et du brouillard, influençant la diffusion des odeurs. Dans les vallées, l'air réchauffé monte des fonds plats pendant la journée et, en se rafraichissant, redescend la nuit en entraînant des effets sur la dispersion.

Les figures 39 et 40 montrent le mouvement de l'air contenant des odeurs qui monte ou descend une pente. Cela doit être pris en compte lors de la planification d'une recherche ou de l'observation du travail d'un chien dans une zone particulière à un moment précis de la journée.

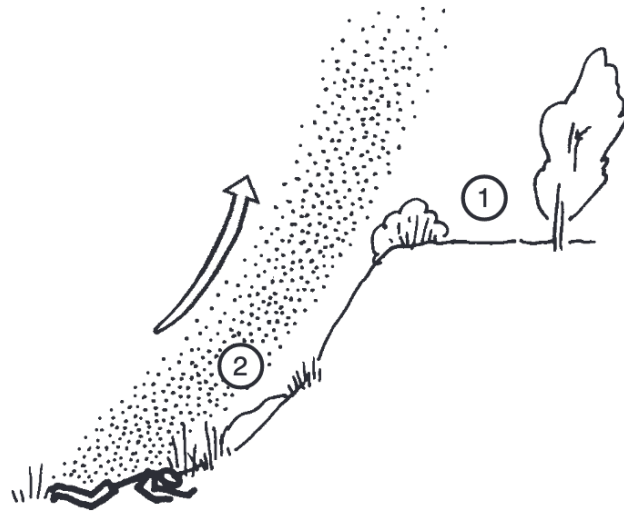


Figure 39 : Courant ascendant créant un vide olfactif (1) et cône olfactif éloigné (2) au-dessus du corps (d'après Rebmann et David, 2000)

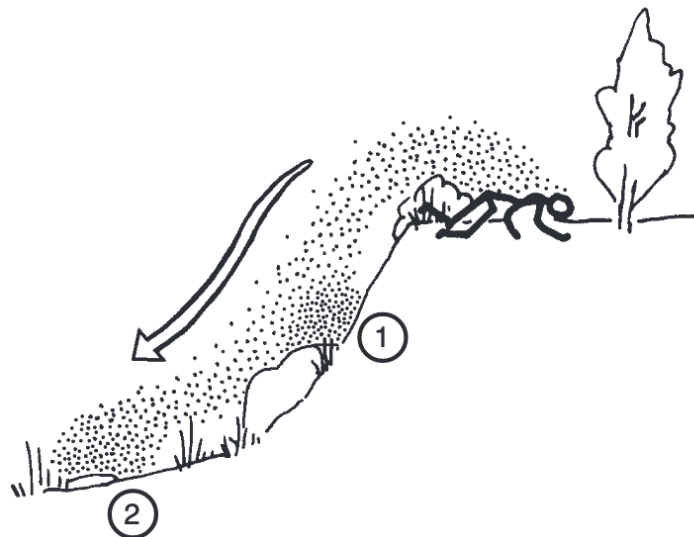


Figure 40 : Courant descendant créant des bassins olfactifs éloignés sous le corps (d'après Rebmann et David, 2000)

b. Microclimats et barrières :

Des structures comme des arbres ou des bâtiments peuvent créer des microclimats et modifier la direction de l'air odorant. L'air peut s'élever du côté ensoleillé d'un arbre ou d'un bâtiment (parfois appelé effet cheminée) et une fois du côté ombragé, il peut se refroidir puis redescendre. L'air chaud est moins dense que l'air froid, et le mouvement de l'air entre les pressions atmosphériques différentes peut créer des tourbillons qui compliquent la localisation de l'odeur (Figure 41).

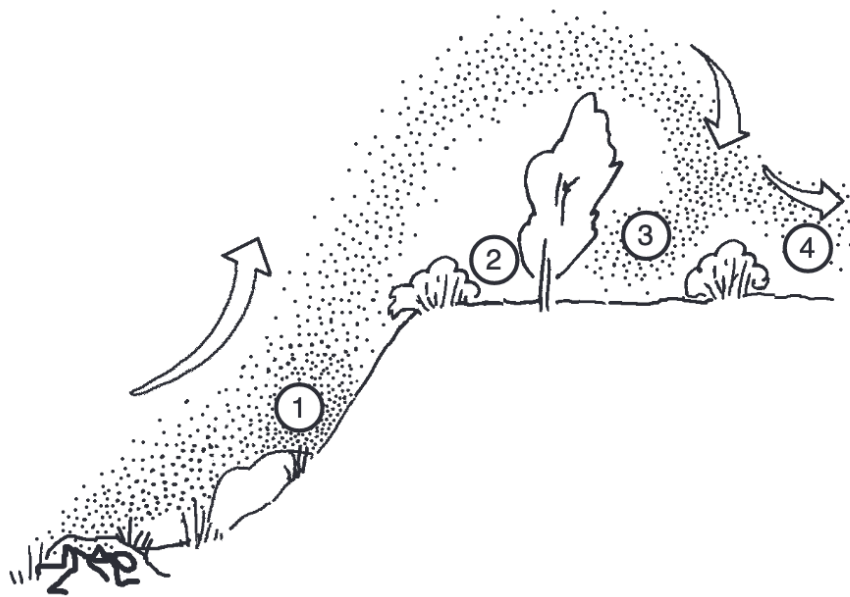


Figure 41 : Interprétation des alertes complexes (d'après Rebmann et David, 2000)

1 et 3 : bassins olfactifs éloignés ; 2 : vide olfactif ; 4 : cône olfactif éloigné

c. Influence du sol :

Les différents types de sol filtrent les composés chimiques des restes humains à des vitesses différentes (Annexe 3). Par exemple, le sable laisse passer facilement les substances, tandis que l'argile retient les composés volatils. La profondeur à laquelle un corps est enterré et la nature du sol influencent la vitesse à laquelle les COV atteignent la surface. (Stejskal, 2012)

d. Plantes et environnement naturel :

Selon une étude réalisée par Vass *et al.*, les auteurs ont indiqué qu'il a fallu 17 jours pour que les premiers composés volatils atteignent la surface du sol à partir de dépouilles enterrées à 0,45 m de profondeur. (Vass *et al.*, 2008)

Les oligo-éléments chimiques organiques et inorganiques sont absorbés et peuvent être présents dans les sols pendant une longue période après le retrait du corps. Les plantes absorbent des produits chimiques via l'eau ou les biosolides. Cela peut provoquer une accumulation de ces substances dans leurs tissus. Ainsi les produits chimiques issus de la décomposition des corps peuvent être absorbés par les racines des plantes et transportés dans leurs feuilles. Ces substances peuvent y être stockées ou libérées dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau lors de la transpiration. Une végétation dense et basse, notamment à feuilles larges, peut empêcher la diffusion des odeurs, ce qui rend plus difficile la localisation des restes humains par les chiens.

Enfin, les produits chimiques présents dans l'environnement peuvent affecter les plantes et leurs interactions avec les animaux, et influencent aussi la détection des odeurs dans le cadre de recherches par des chiens. (Stejskal, 2012)

e. Importance de l'eau et des précipitations

Les substances chimiques associées aux restes humains peuvent se déplacer avec l'eau dans l'environnement. Ainsi, comprendre les cycles de l'eau, comme l'humidité, l'évaporation, la condensation, la transpiration, et la précipitation, est essentiel pour anticiper comment ces produits chimiques, et donc les odeurs, se diffusent.

L'air saturé d'humidité (eau sous forme de vapeur) peut influencer la dispersion des odeurs. Les précipitations, comme la pluie, le brouillard, ou la neige, agissent différemment sur les odeurs. Par exemple, une végétation dense ou le brouillard peuvent limiter la diffusion des odeurs, rendant la tâche des chiens de recherche plus complexe.

Les molécules odorantes peuvent être transportées par l'eau loin du corps en décomposition par gravité. L'odeur peut être incorporée dans les eaux souterraines drainées et être transportée par les cours d'eau sous-marins, pour finalement réapparaître dans des zones éloignées du corps (Figure 42). De même, l'odeur peut s'écouler loin du corps le long de la surface, en descendant une colline, avec l'eau en mouvement, réduisant ainsi l'absorption dans le sol sous le corps et réduisant la concentration de molécules dans le cône odorant près du corps (Figure 43).

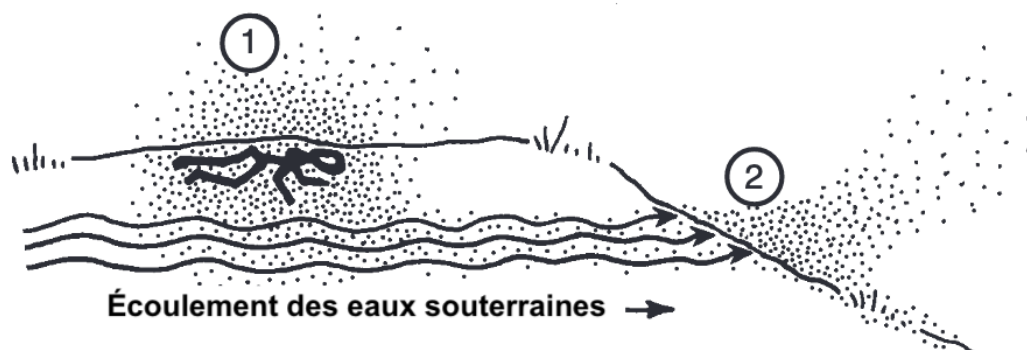


Figure 42 : Bassins/cônes d'odeurs primaires et secondaires (d'après Rebmann et David, 2000)

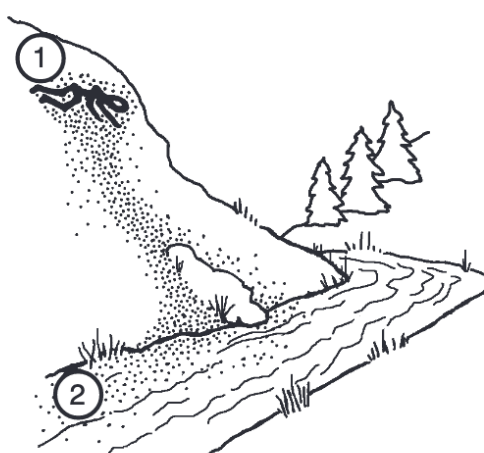


Figure 43 : L'odeur se répand en aval par ruissellement de surface en direction d'un ruisseau ou du bassin olfactif secondaire (d'après Rebmann et David, 2000)

Un cas spécial est celui de la détection de corps sous l'eau. Les premières sources d'odeurs comprennent probablement les gaz (dissous dans l'eau et dans les bulles), les liquides (panaches et gouttelettes) et les solides (tissus, etc.). Les processus potentiels de transport d'odeurs pour les COV dissous dans l'eau comprenaient la diffusion moléculaire, la diffusion turbulente et l'entraînement dans un flux ascendant de bulles, de liquide flottant et de solides. Le gaz était libéré des suintements sous forme de bulles qui étaient souvent recouvertes d'huile. Une fois que les bulles de gaz atteignaient la surface de l'eau, elles éclataient et laissaient un « éclat huileux » sur l'eau (Osterkamp, 2011). Les courants d'eau transportent l'odeur loin d'un corps sous l'eau. Selon les gradients de température dans la colonne d'eau, l'odeur peut être ramenée à la surface juste au-dessus ou plus loin du corps (Figure 44). Dans les lacs sans courant, il est probable que l'odeur s'accumule à proximité immédiate du défunt. Les conditions venteuses au-dessus des lacs ou des rivières ainsi que les courants de surface et souterrains peuvent vraiment affecter la dispersion des odeurs

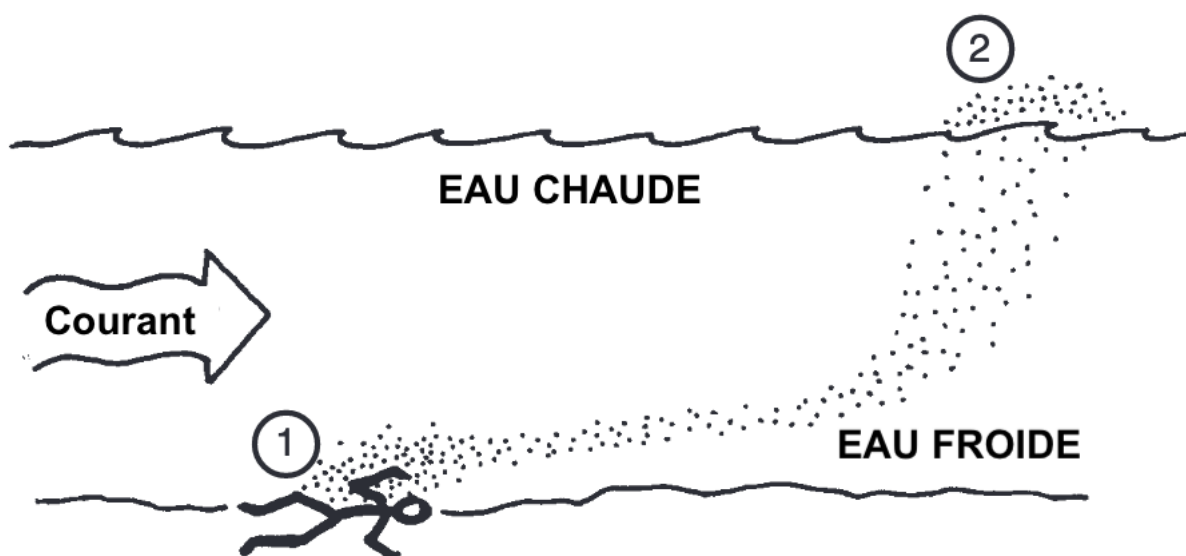


Figure 44 : Création d'un bassin olfactif à distance du corps par le courant d'eau (d'après Rebmann et David, 2000)

f. Conditions intérieures

À l'intérieur, des facteurs comme la ventilation ou les températures élevées influencent le déplacement et la concentration des odeurs. Les odeurs peuvent se concentrer près de la source en l'absence de chaleur ou de mouvement d'air.

Dans un salon fermé, un cadavre peut rapidement s'équilibrer avec l'atmosphère environnante en ce qui concerne certaines odeurs volatiles courantes (comme la cadavérine et la putrescine), atteignant ainsi une concentration maximale uniforme dans l'air, sans gradient de concentration. Cela peut rendre difficile la localisation du corps par un chien s'il n'est pas visible. En revanche, une petite source d'odeur avec des composés moins volatils dans la même pièce peut mettre plusieurs jours, voire des semaines, à se diffuser dans l'air (Goss, 2019). Des techniques de forages peuvent être utilisées afin de créer des puits odorants, facilitant la dispersion des molécules odorantes.

L'acuité olfactive est un phénomène complexe et variable, influencé par de nombreux facteurs humains et environnementaux. La décomposition d'un corps humain passe par plusieurs étapes, chacune étant caractérisée par des processus cellulaires et systémiques spécifiques, lesquels modifient de manière progressive le profil olfactif du cadavre. Les composés organiques volatils (COV), résultant de cette décomposition, sont essentiels pour la localisation des corps, mais leur nature et leur diffusion varient grandement en fonction de l'environnement.

Les facteurs primaires, tels que la température, la microbiologie et l'entomologie, jouent un rôle clé dans la vitesse et la manière dont un corps se décompose. En parallèle, des facteurs secondaires, comme le type de sol ou les conditions extrêmes, peuvent altérer la nature des effluves libérés. Les caractéristiques individuelles d'un cadavre, ainsi que les conditions environnementales spécifiques (topographie, vent, microclimats), influencent également la diffusion des COV.

L'étude des variations des COV permet non seulement une meilleure compréhension des processus de décomposition, mais aussi une meilleure localisation des corps dans divers contextes, qu'ils soient naturels ou artificiels. La prise en compte de ces multiples paramètres est donc cruciale pour les enquêtes médico-légales, la recherche des disparus et les interventions en conditions extrêmes. Grâce à l'analyse de ces données, le maître-chien peut donc lancer une recherche dans les meilleures conditions (Figure 45).

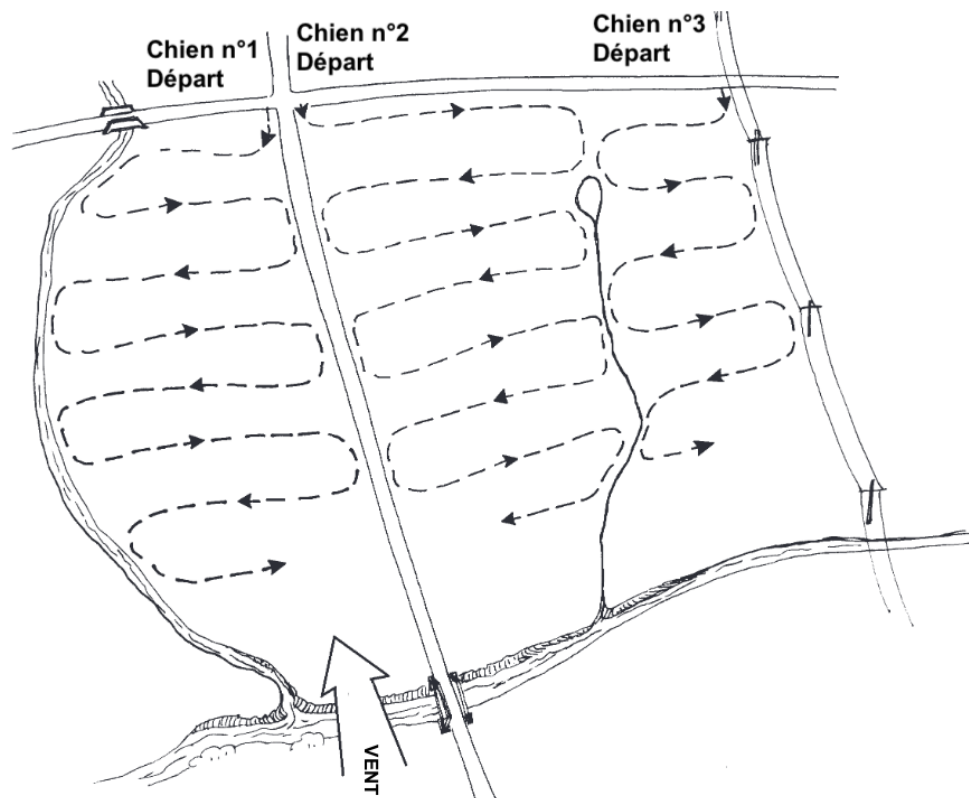


Figure 45 : Exemple d'un type de recherche en quadrillage le long de couloirs étroits (d'après Rebmann et David, 2000)

Conclusion

L'olfaction canine constitue un outil puissant et irremplaçable dans le domaine de la détection et de la localisation de restes humains. Grâce à ses capacités olfactives hors normes, le chien peut détecter des odeurs imperceptibles à l'homme, même dans des conditions difficiles. Cette thèse a souligné la complexité du système olfactif canin et expliqué comment cette sensibilité extrême est mise au service de l'homme dans divers contextes, tels que les enquêtes criminelles, les catastrophes naturelles et les missions de secours.

Tout au long de cette recherche, il est apparu que de nombreux facteurs influencent l'acuité olfactive du chien. Des variables individuelles comme la race, l'âge, le sexe ou l'état physique jouent un rôle déterminant dans l'efficacité olfactive. Par ailleurs, des facteurs environnementaux tels que la température, le vent ou les précipitations modulent également les performances des chiens, nécessitant des stratégies adaptées pour chaque situation. Les éléments liés à la décomposition des cadavres et à la formation des chiens de recherche sont aussi des aspects critiques à prendre en compte, car ils influencent directement la capacité des chiens à identifier et localiser les restes humains.

Cependant, malgré ces facteurs de variation, il est indéniable que les chiens spécialisés dans la recherche de cadavres apportent une contribution essentielle à la médecine légale et aux opérations de sauvetage. Leur formation rigoureuse, leur capacité à s'adapter à divers terrains et leur dévouement font d'eux des partenaires indispensables dans la localisation de restes humains, souvent dans des contextes où d'autres méthodes échouent.

Enfin, à l'issue de cette rédaction plusieurs questions peuvent se poser.

Tout d'abord, serait-il intéressant de former à la recherche de restes humains des chiens déjà formés à la recherche de personnes égarées ou disparues ? Une étude de Lit et Crawford a montré que les chiens polyvalents, formés à détecter à la fois des humains vivants et des cadavres, ont des performances inférieures comparées aux chiens spécialisés uniquement dans la détection des vivants, même en l'absence d'odeur de cadavre. Les chiens polyvalents ont du mal à résoudre les problèmes complexes, ont tendance à signaler des alertes même sans odeur présente, et dépendent trop des signaux subtils des humains. Ces résultats indiquent qu'il est déconseillé d'utiliser des chiens polyvalents dans des situations de recherche où seules des victimes vivantes sont recherchées, comme lors de catastrophes. (Lit et Crawford, 2006)

Enfin, comme nous avons pu le voir, la formation des chiens de recherche de restes humains est permise par l'émission de composés organiques volatils produits lors de la décomposition. Or, dans de nombreuses affaires criminelles, les corps des victimes ne sont malheureusement pas retrouvés avant la décomposition complète et l'apparition du stade de squelettisation. Voici donc la principale limite à la recherche de restes humains : l'absence de matière organique ne permettant pas aux chiens formés à la recherche de restes humains de détecter ces corps. L'os aurait-il une odeur ? Suffirait-elle pour former des chiens à la recherche de ces ossements et donc étendre les durées de recherche et espérer retrouver de nombreuses victimes ? L'étude de Ouimet a répondu en partie à ces questions. Elle a tout d'abord montré que plus de 200 COV sont retrouvés dans les ossements. De plus, des chiens formés sur des ossements contenant des tissus mous résiduels ont obtenu un taux de détection légèrement moindre ainsi qu'une durée de recherche plus longue,

comparativement à des os utilisés durant l'entraînement, lors de recherche d'os obtenus après un processus de décomposition comparable à celui observé dans un contexte de médecine légale réel. (Ouimet, 2024)

En conclusion, l'olfaction canine, bien que sujette à de nombreuses influences, demeure un outil inestimable pour l'identification et la localisation des restes humains. Cette thèse souligne la nécessité de continuer à approfondir nos connaissances sur ces mécanismes afin de renforcer la coopération entre l'homme et le chien dans les domaines critiques de la médecine légale et des secours.

Liste des références bibliographiques

- ACHE, B.W., YOUNG, J.M. (2005) Olfaction: diverse species, conserved principles, review. *Neuron* vol. 48, n° 3, p. 417-430. [<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.10.022>]
- AKSENOV, A.A., GOJOVA, A., ZHAO, W., *et al.* (2012) Characterization of volatile organic compounds in human leukocyte antigen heterologous expression systems: a cell's "chemical odor fingerprint". *ChemBioChem* vol. 13, n° 7, p. 1053-1059. [<https://doi.org/10.1002/cbic.201200011>]
- ALEXANDER, M.B., HODGES, T.K., BYTHEWAY, J., *et al.* (2015) Application of soil in forensic science: residual odor and HRD dogs. *Forensic Science International* vol. 249, p. 304-313. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.01.025>]
- ALEXANDER, M.B., HODGES, T.K., WESCOTT, D.J., *et al.* (2016) The effects of soil texture on the ability of human remains detection dogs to detect buried human remains. *Journal of Forensic Sciences* vol. 61, n° 3, p. 649-655. [<https://doi.org/10.1111/1556-4029.13084>]
- ANGLE, C., WAGGONER, L.P., FERRANDO, A., *et al.* (2016) Canine detection of the volatilome: a review of Implications for pathogen and disease detection. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 3, n° 47. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00047>]
- ANGLE, C.T., WAKSHLAG, J.J., GILLETTE, R.L., *et al.* (2014) The effects of exercise and diet on olfactory capability in detection dogs. *Journal of Nutritional Science* vol. 3, n° 44. [<https://doi.org/10.1017/jns.2014.35>]
- ARMSTRONG, P., NIZIO, K.D., PERRAULT, K.A., *et al.* (2016) Establishing the volatile profile of pig carcasses as analogues for human decomposition during the early postmortem period. *Heliyon* vol. 2, n° 2. [<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00070>]
- AVILES-ROSA, E., SCHULTZ, J., MAUGHAN, M.N., *et al.* (2024) A canine model to evaluate the effect of exercise intensity and duration on olfactory detection limits: the running nose. *Frontiers in Allergy* vol. 5. [<https://doi.org/10.3389/falgy.2024.1367669>]
- BARONE, R. (2004) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Paris, Editions Vigot.
- BARONE, R. (1997) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Paris, Editions Vigot.
- BARYAH, N., KRISHAN, K., KANCHAN, T. (2019) The development and status of forensic anthropology in India: A review of the literature and future directions. *Medicine, Science and the Law* vol. 59, n° 1, p. 61-69. [<https://doi.org/10.1177/0025802418824834>]
- BELTZ, K. (2013) The development of calibrants through characterization of volatile organic compounds from peroxide based explosives and a non-target chemical calibration compound. Thèse de chimie. Florida International University. [<https://doi.org/10.25148/etd.FI13040501>]
- BLANAR, K., PRADA-TIEDEMANN, P.A. (2020) Characterization of the volatile odor profile from larval masses in a field decomposition setting. *Forensic Chemistry* vol. 21, n° 100288. [<https://doi.org/10.1016/j.forc.2020.100288>]

- BRÄUER, J., BLASI, D. (2021) Dogs display owner-specific expectations based on olfaction. *Scientific Reports* vol. 11, n° 3291. [<https://doi.org/10.1038/s41598-021-82952-4>]
- BROOKES, P.C. (2008) Principles and methodologies of measuring microbiological activity and biomass in soil. In Tibbett, M., Carter, D.O. (Éd.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy, Chap.10*. New-York, CRC Press, p. 145-150.
- BRUCKS, D., SOLIANI, M., RANGE, F., *et al.* (2017) Reward type and behavioural patterns predict dogs' success in a delay of gratification paradigm. *Scientific Reports* vol. 7, n° 42459. [<https://doi.org/10.1038/srep42459>]
- BUCK, L.B. (2005) Unraveling the sense of smell. *Nobel Lecture, Angewandte Chemie International* vol. 44, n° 38, p. 6128-6140.
- CHARLES, M., RUSZKIEWICZ, D., ECKBO, E., *et al.* (2024) The science behind the nose: correlating volatile organic compound characterisation with canine biodetection of COVID-19. *ERJ Open Research* vol. 10, n° 00007. [<https://doi.org/10.1183/23120541.00007-2024>]
- CIEŚLA, J., SKROBISZ, J., NICIŃSKI, B., *et al.* (2023) The smell of death. State-of-the-art and future research directions. *Frontiers in Microbiology* vol. 14. [<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260869>]
- CLARK, M.S., WORRELL, M.B., PLEUSS, J.E. (1997) Postmortem changes in soft tissue. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.9*. Boca Raton, CRC Press, p. 131-144.
- CLASES, D., UELAND, M., GONZALEZ DE VEGA, R., *et al.* (2021) Quantitative speciation of volatile sulphur compounds from human cadavers by GC-ICP-MS. *Talanta* vol. 221, n° 121424. [<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121424>]
- CLÉMENT, M. (2022) The smell of death - Development of detection methods and applications for « cadaver dogs » training. Thèse en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université de Namur.
- COLLIN, B. (2003) Anatomie du chien. Liège, Derouaux Ordina.
- CONCHA, A., MILLS, D.S., FEUGIER, A., *et al.* (2014) Using sniffing behavior to differentiate true negative from false negative responses in trained scent-detection dogs. *Chemical Senses* vol. 39, n° 9, p. 749-754. [<https://doi.org/10.1093/chemse/bju045>]
- CONCHA, A.R., GUEST, C.M., HARRIS, R., *et al.* (2019) Canine olfactory thresholds to amyl acetate in a biomedical detection scenario. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 5, n° 345. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00345>]
- COURTIN, S. (2009) Étude des variations des paramètres biologiques lors de l'entraînement des chiens du centre national d'instruction cynophile de la gendarmerie. Thèse de médecine vétérinaire. École vétérinaire nationale de Toulouse.
- CRAVEN, B.A., PATERSON, E.G., SETTLES, G.S. (2010) The fluid dynamics of canine olfaction: unique nasal airflow patterns as an explanation of macrosmia. *Journal of The Royal Society Interface* vol. 7, n° 47, p. 933-943. [<https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0490>]

- CURRAN, A.M., PRADA, P.A., FURTON, K.G. (2010) The differentiation of the volatile organic dignatures of individuals through SPME-GC/MS of characteristic human scent compounds. *Journal of Forensic Sciences* vol. 55, n° 1, p. 50-57. [<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01236.x>]
- DARGAN, R., FORBES, S.L. (2021) Cadaver-detection dogs: a review of their capabilities and the volatile organic compound profile of their associated training aids. *WIREs Forensic Science* vol. 3, n° 6. [<https://doi.org/10.1002/wfs2.1409>]
- DARGAN, R., SAMSON, C., BURR, W.S., *et al.* (2022) Validating the use of amputated limbs used as cadaver detection dog training aids. *Frontiers in Analytical Science* vol. 2, n° 934639. [<https://doi.org/10.3389/frans.2022.934639>]
- DEGREEFF, L.E. (2010) Development of a dynamic headspace concentration technique for the non-contact sampling of human odor samples and the creation of canine training aids. Thèse de chimie. Florida International University. [<https://doi.org/10.25148/etd.FI10120312>]
- DEGREEFF, L.E., FURTON, K.G. (2011) Collection and identification of human remains volatiles by non-contact, dynamic airflow sampling and SPME-GC/MS using various sorbent materials. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* vol. 401, n° 4, p. 1295-1307. [<https://doi.org/10.1007/s00216-011-5167-0>]
- DEGREEFF, L.E., SCHULTZ, C.A. (2022) *Canines: the original biosensors*. Singapore, Jenny Stanford.
- DEKEIRSSCHIETER, J., VERHEGGEN, F.J., GOHY, M., *et al.* (2009) Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus* L.) in different biotopes. *Forensic Science International* vol. 189, n° 1-3, p. 46-53. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.03.034>]
- DEMULIERE, Y. (2008) Les équipes cynotechniques sapeurs-pompiers de France. Thèse de médecine vétérinaire. École vétérinaire nationale d'Alfort.
- DENAPOLI, J.S., DODMAN, N.H., SHUSTER, L., *et al.* (2000) Effect of dietary protein content and tryptophan supplementation on dominance aggression, territorial aggression, and hyperactivity in dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 217, n° 4, p. 504-508. [<https://doi.org/10.2460/javma.2000.217.504>]
- DORMAN, D.C., FOSTER, M.L., LAZAROWSKI, L. (2021) Training with multiple structurally related odorants fails to Improve generalization of ammonium nitrate detection in domesticated dogs (*Canis familiaris*). *Animals* vol. 11, n° 213. [<https://doi.org/10.3390/ani11010213>]
- DUCRETTET, F., GEORGES, P., NOLOT, F., *et al.* (2013) Organisation, méthodes et recherches en archéologie criminalistique à l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale. À propos de 20ans d'expérience. *La Revue de Médecine Légale* vol. 4, n° 1, p. 27-37. [<https://doi.org/10.1016/j.medleg.2012.10.002>]
- DZIĘCIOŁ, M., PODGÓRSKI, P., STAŃCZYK, E., *et al.* (2020) MRI Features of the vomeronasal organ in dogs (*canis familiaris*). *Frontiers in Veterinary Science* vol. 7, n° 159. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00159>]
- ERSKINE, K.L., ARMSTRONG, E.J. (2021) *Water-related death investigation: practical methods and forensic applications*, Second edition. Boca Raton, FL, CRC Press.

- EVANS, H.E., DE LAHUNTA, A. (2013) Miller's anatomy of the dog, 4ème édition. St. Louis, Missouri, Elsevier.
- FENTON, V. (1992) The use of dogs in search, rescue and recovery. *Journal of Wilderness Medicine* vol. 3, n° 3, p. 292-300. [<https://doi.org/10.1580/0953-9859-3.3.292>]
- FERRY, B., ENSMINGER, J.J., SCHOON, A., *et al.* (2019) Scent lineups compared across eleven countries: looking for the future of a controversial forensic technique. *Forensic Science International* vol. 302, n° 109895. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109895>]
- FISCHER-TENHAGEN, C., JOHNEN, D., HEUWIESER, W., *et al.* (2017) Odor perception by dogs: evaluating two training approaches for odor learning of sniffer dogs. *Chemical Senses* vol. 42, n° 5, p. 435-441. [<https://doi.org/10.1093/chemse/bjx020>]
- FITZPATRICK, R.W. (2008) Nature, distribution, and origin of soil materials in forensic comparison of soils. In Tibbett, M., Carter, D.O. (Éd.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy, Chap.1*. New-York, CRC Press, p. 1-28.
- FORBES, S.L. (2008) Decomposition chemistry in a burial environment. In Tibbett, M., Carter, D.O. (Éd.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy, Chap.8*. New-York, CRC Press, p. 203-224.
- FORBES, S.L., PERRAULT, K.A. (2014) Decomposition odour profiling in the air and soil surrounding vertebrate carrion. *PLoS ONE* vol. 9, n° 4. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095107>]
- FORBES, S.L., PERRAULT, K.A., STEFANUTO, P.-H., *et al.* (2014) Comparison of the decomposition VOC profile during winter and summer in a moist, mid-latitude (Cfb) climate. *PLoS ONE* vol. 9, n° 11. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113681>]
- FOYER, P., SVEDBERG, A.-M., NILSSON, E., *et al.* (2016) Behavior and cortisol responses of dogs evaluated in a standardized temperament test for military working dogs. *Journal of Veterinary Behavior* vol. 11, p. 7-12. [<https://doi.org/10.1016/j.jveb.2015.09.006>]
- FURTON, K.G., CARABALLO, N.I., CERRETA, M.M., *et al.* (2015) Advances in the use of odour as forensic evidence through optimizing and standardizing instruments and canines. *Philosophical Transactions* vol. 370, n° 1674. [<https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0262>]
- GALLOWAY, A. (1997) The process of decomposition: A model from the Arizona- Sonoran desert. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.8*. Boca Raton, CRC Press, p. 119-130.
- GETXENT (2024) Restes Humains - Tubes Getxent imprégnés. In *Getxent*. [<https://getxent.com/fr/products/odor-getxent-tubes-cadaver>] (consulté le 03/01/2024).
- GILL-KING, H. (1997) Chemical and ultrastructural aspects of decomposition. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.6*. Boca Raton, CRC Press, p. 556-571.
- GOSS, K.-U. (2019) The physical chemistry of odors — consequences for the work with detection dogs. *Forensic Science International* vol. 296, p. 110-114. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.01.023>]

- GRANDJEAN, D., HAYMANN, F. (2010) Encyclopédie du Chien. Paris, Royal Canin.
- GRANDJEAN, D., SARKIS, R., LECOQ-JULIEN, C., *et al.* (2020) Can the detection dog alert on COVID-19 positive persons by sniffing axillary sweat samples? A proof-of-concept study. *PLOS ONE* vol. 15, n° 12. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243122>]
- GREBENKEMPER, J., MORRIS, A., BYRD, B.F., *et al.* (2021) Applying canine detection in support of collaborative archaeology. *Advances in Archaeological Practice* vol. 9, n° 3, p. 226-237. [<https://doi.org/10.1017/aap.2021.12>]
- HAGLUND, W. (1997) Dogs and coyotes: Postmortem involvement with human remains. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.23*. Boca Raton, CRC Press, p. 573-587.
- HAGLUND, W.D., SORG, M.H., CORREIA, P.M. (Éd.) (1997) Fire modification of bone: a review of the literature. In *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.18*. Boca Raton, CRC Press, p. 257-275.
- HALL, N., GLENN, K., SMITH, D., *et al.* (2015) Performance of pugs, german shepherds, and greyhounds (*canis lupus familiaris*) on an odor-discrimination task. *Journal of Comparative Psychology* vol. 129, n° 3, p. 237-246. [<https://doi.org/26010195>]
- HALL, N.J., WYNNE, C.D.L. (2018) Odor mixture training enhances dogs' olfactory detection of home-made explosive precursors. *Heliyon* vol. 4, n° 12. [<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00947>]
- HARBECK, M., SCHLEUDER, R., SCHNEIDER, J., *et al.* (2011) Research potential and limitations of trace analyses of cremated remains. *Forensic Science International* vol. 204, n° 1-3, p. 191-200. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.06.004>]
- HASKELL, N.H., HALL, R.D., CERVANKA, V., *et al.* (1997) On the body: Insects' life stage, presence, and their postmortem artifacts. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.27*. Boca Raton, CRC Press, p. 375-408.
- HAYES, J.E., MCGREEVY, P.D., FORBES, S.L., *et al.* (2018) Critical review of dog detection and the influences of physiology, training, and analytical methodologies. *Talanta* vol. 185, p. 499-512. [<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.04.010>]
- HERIN, G. (2024) It's NOT pseudo with Gregory Herin of Getxent. In *Youtube*. [https://www.youtube.com/watch?v=KCdTHA_TsKU] (consulté le 30/07/2024).
- HIRAI, T., KOJIMA, S., SHIMADA, A., *et al.* (1996) Age-related changes in the olfactory system of dogs. *Neuropathology and Applied Neurobiology* vol. 22, n° 6, p. 531-539. [<https://doi.org/doi:10.1111/j.1365-2990.1996.tb01132.x>]
- HOFFMAN, E.M., CURRAN, A.M., DULGERIAN, N., *et al.* (2009) Characterization of the volatile organic compounds present in the headspace of decomposing human remains. *Forensic Science International* vol. 186, n° 1-3, p. 6-13. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2008.12.022>]
- HOLLEY, A. (2006) Système olfactif et neurobiologie. *Terrain* n° 47, p. 107-122. [<https://doi.org/10.4000/terrain.4271>]

- JANAWAY, R.C. (2008) Decomposition of materials associated with buried cadavers. In Tibbett, M., Carter, D.O. (Éd.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy, Chap.7*. New-York, CRC Press, p. 153-202.
- JENKINS, E.K., DECHANT, M.T., PERRY, E.B. (2018) When the nose doesn't know: canine olfactory function associated with health, management, and potential links to microbiota. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 5, n° 56. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00056>]
- JEZIERSKI, T., ADAMKIEWICZ, E., WALCZAK, M., *et al.* (2014) Efficacy of drug detection by fully-trained police dogs varies by breed, training level, type of drug and search environment. *Forensic Science International* vol. 237, p. 112-118. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.01.013>]
- JEZIERSKI, T., ENSMINGER, J., PAPET, L.E. (2016) Canine olfaction science and law - advances in forensic science, medicine, conservation, and environmental remediation. Boca Raton, Floride, CRC press.
- JOHNEN, D., HEUWIESER, W., FISCHER-TENHAGEN, C. (2017) An approach to identify bias in scent detection dog testing. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 189, p. 1-12. [<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.01.001>]
- JONES, K.E., DASHFIELD, K., DOWNEND, A.B., *et al.* (2004) Search-and-rescue dogs: an overview for veterinarians. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 225, n° 6, p. 854-860. [<https://doi.org/10.2460/javma.2004.225.854>]
- KALMUS, H. (1955) The discrimination by the nose of the dog of individual human odours and in particular of the odours of twins. *The British Journal of Animal Behaviour* vol. 3, n° 1, p. 25-31. [[https://doi.org/10.1016/S0950-5601\(55\)80072-X](https://doi.org/10.1016/S0950-5601(55)80072-X)]
- KELLY, J.A., VAN DER LINDE, T.C., ANDERSON, G.S. (2009) The influence of clothing and wrapping on carcass decomposition and arthropod succession during the warmer seasons in central South Africa. *Journal of Forensic Sciences* vol. 54, n° 5, p. 1105-1112. [<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01113.x>]
- KNOBEL, Z., UELAND, M., NIZIO, K.D., *et al.* (2019) A comparison of human and pig decomposition rates and odour profiles in an Australian environment. *Australian Journal of Forensic Sciences* vol. 51, n° 5, p. 557-572. [<https://doi.org/10.1080/00450618.2018.1439100>]
- KOKOCIŃSKA-KUSIAK, A., WOSZCZYŁO, M., ZYBALA, M., *et al.* (2021) Canine olfaction: physiology, behavior, and possibilities for practical applications. *Animals* vol. 11, n° 8. [<https://doi.org/10.3390/ani11082463>]
- LAZAROWSKI, L., KRICHBAUM, S., DEGREEFF, L.E., *et al.* (2020) Methodological considerations in canine olfactory detection research. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 7, p. 408. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00408>]
- LÉGIFRANCE (2021) Article L1261-1 du Code de la Santé Publique. In *Don de corps à des fins d'enseignement médical et de recherche*. [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006155124/#LEGISCTA000043895781] (consulté le 15/07/2024).

- LIT, L., CRAWFORD, C.A. (2006) Effects of training paradigms on search dog performance. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 98, n° 3-4, p. 277-292. [<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2005.08.022>]
- LIT, L., SCHWEITZER, J.B., OBERBAUER, A.M. (2011) Handler beliefs affect scent detection dog outcomes. *Animal Cognition* vol. 14, n° 3, p. 387-394. [<https://doi.org/10.1007/s10071-010-0373-2>]
- MAEJIMA, M., INOUE-MURAYAMA, M., TONOSAKI, K., *et al.* (2007) Traits and genotypes may predict the successful training of drug detection dogs. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 107, n° 3-4, p. 287-298. [<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.10.005>]
- MANDAIRON, N., STACK, C., LINSTER, C. (2006) Olfactory enrichment improves the recognition of individual components in mixtures. *Physiology & Behavior* vol. 89, n° 3, p. 379-384. [<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.07.013>]
- MARCHAL, S., BREGERAS, O., PUAUX, D., *et al.* (2016) Rigorous training of dogs leads to high accuracy in human scent matching-to-sample performance. *PLOS ONE* vol. 11, n° 2. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146963>]
- MATUSZEWSKI, S., HALL, M.J.R., MOREAU, G., *et al.* (2020) Pigs vs people: the use of pigs as analogues for humans in forensic entomology and taphonomy research. *International Journal of Legal Medicine* vol. 134, n° 2, p. 793-810. [<https://doi.org/10.1007/s00414-019-02074-5>]
- MAUGHAN, M.N., GADBERRY, J.D., SHARPES, C.E., *et al.* (2024) Calibrating canines—a universal detector calibrant for detection dogs. *Frontiers in Allergy* vol. 5. [<https://doi.org/10.3389/falgy.2024.1366596>]
- METTING, F.B. (2008) Structure and physiological ecology of soil microbial communities. In Tibbett, M., Carter, D.O. (Éd.), *Soil Analysis in Forensic Taphonomy, Chap. 1*. New-York, CRC Press, p. 1-28.
- MICCOZZI, M.S. (1997) Frozen environments and soft tissue preservation. In Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap. 11*. Boca Raton, CRC Press, p. 151-160.
- MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR (2024) Centre national d'instruction cynophile de la gendarmerie - CNICG. In *Commandement des écoles de la Gendarmerie nationale*. [<https://www.gendarmerie.interieur.gouv.fr/cegn/les-centres-de-formation/centre-national-d-instruction-cynophile-de-la-gendarmerie-cnicg>] (consulté le 05/05/2024).
- MORTON, R.J., LORD, W.D. (2006) Taphonomy of child-sized remains: a study of scattering and scavenging in Virginia. *Journal of Forensic Sciences* vol. 51, n° 3, p. 475-479. [<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00134.x>]
- MUNGER, S.D., LEINDERS-ZUFALL, T., ZUFALL, F. (2009) Subsystem organization of the mammalian sense of smell. *Annual Review of Physiology* vol. 71, n° 1, p. 115-140. [<https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.70.113006.100608>]
- ONYEJIKE, D.N., FISCHER, V.A., ESOMONU, U.G., *et al.* (2022) Estimation of time since death of bodies above soil surface in a guinea forest-savannah vegetation of nigeria using visible post mortem changes. *International Journal of Anatomy and Research* vol. 10, n° 3, p. 8398-8407. [<https://doi.org/10.16965/ijar.2022.169>]

- OSTERKAMP, T. (2011) K9 water searches: scent and scent transport considerations: scent and scent transport considerations. *Journal of Forensic Sciences* vol. 56, n° 4, p. 907-912. [<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.01773.x>]
- OUIMET, F. (2024) Identification du profil des composés organiques volatiles provenant d'ossements humains et évaluation de leur pertinence pour l'entraînement des chiens détecteurs de cadavres. Thèse de chimie. Trois-rivières, Université du Québec.
- PARR-CORTES, Z., MÜLLER, C.T., TALAS, L., *et al.* (2024) The odour of an unfamiliar stressed or relaxed person affects dogs' responses to a cognitive bias test. *Scientific Reports* vol. 14, n° 15843. [<https://doi.org/10.1038/s41598-024-66147-1>]
- PELOSI, P., KNOLL, W. (2022) Odorant-binding proteins of mammals. *Biological reviews* vol. 97, n° 1, p. 20-44. [<https://doi.org/10.1111/brv.12787>]
- POLGÁR, Z., KINNUNEN, M., ÚJVÁRY, D., *et al.* (2016) A test of canine olfactory capacity: comparing various dog breeds and wolves in a natural detection task. *PLOS ONE* vol. 11, n° 5. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154087>]
- PRICHARD, A., CHHIBBER, R., KING, J., *et al.* (2020) Decoding odor mixtures in the dog brain: an awake fMRI study. *Chemical Senses* vol. 45, n° 9, p. 833-844. [<https://doi.org/10.1093/chemse/bjaa068>]
- PSYCHA ANALYSE (2024) Présentation de deux types de conditionnement. *In Le conditionnement*. [[https://psychanalyse.com/pdf/PRESENTATION%20DE%20DEUX%20TYPES%20DE%20CONDITIONNEMENT%20-%20COURS%20DE%20PSYCHOLOGIE%20GENERALE%20ET%20EXPERIMENTALE%20\(6%20Pages%20-%20170%20Ko\).pdf](https://psychanalyse.com/pdf/PRESENTATION%20DE%20DEUX%20TYPES%20DE%20CONDITIONNEMENT%20-%20COURS%20DE%20PSYCHOLOGIE%20GENERALE%20ET%20EXPERIMENTALE%20(6%20Pages%20-%20170%20Ko).pdf)]
- REBMANN, A., DAVID, E. (2000) *Cadaver dog handbook*. Boca Raton, Floride, CRC Press. [<https://doi.org/10.4324/9780429293900>]
- REYNOLDS, A., REINHART, G., CAREY, D., *et al.* (1999) Effect of protein intake during training on biochemical and performance variables in sled dogs. *American Journal of Veterinary Research* vol. 60, n° 7, p. 789-795. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.1999.60.07.789>]
- SALAZAR, I., CIFUENTES, J.M., SÁNCHEZ-QUINTEIRO, P. (2013) Morphological and immunohistochemical features of the vomeronasal system in dogs. *The Anatomical Record* vol. 296, p. 146-155. [<https://doi.org/10.1002/ar.22617>]
- SALVECO (2024) Les notes olfactives. *In La chimie inspirée de l'avenir*. [<https://salveco.fr/blog/les-notes-olfactives>] (consulté le 08/08/2024).
- SCHOTSMANS, E.M., MÁRQUEZ-GRANT, N., FORBES, S.L. (2017) *Taphonomy of human remains: forensic analysis of the dead and the depositional environment*. New Jersey, Wiley.
- SCHULTZ, M. (1997) Microscopic structure of bone. *In* Haglund, W.D., Sorg, M.H. (Éd.), *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains, Chap.13*. Boca Raton, CRC Press, p. 167-179.

- SECHI, S., DI CERBO, A., CANELLO, S., *et al.* (2017) Effects in dogs with behavioural disorders of a commercial nutraceutical diet on stress and neuroendocrine parameters. *Veterinary Record* vol. 180, n° 1. [<https://doi.org/10.1136/vr.103865>]
- SIMON, A., LAZAROWSKI, L., SINGLETARY, M., *et al.* (2020) A review of the types of training aids used for canine detection training. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 7, p. 313. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00313>]
- SIMON, A.G. (2022) Analysis of non-hazardous canine training aids for triacetone triperoxide (TATP). *Forensic Chemistry* vol. 30, n° 100440. [<https://doi.org/10.1016/j.forc.2022.100440>]
- SINGH, B. (2017) Textbook of Veterinary Anatomy, 5ème édition. St. Louis, Missouri, Elsevier.
- SINISCALCHI, M., SASSO, R., PEPE, A.M., *et al.* (2011) Sniffing with the right nostril: lateralization of response to odour stimuli by dogs. *Animal Behaviour* vol. 82, n° 2, p. 399-404. [<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.05.020>]
- STADLER, S., STEFANUTO, P.-H., BYER, J.D., *et al.* (2012) Analysis of synthetic canine training aids by comprehensive two-dimensional gas chromatography–time of flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* vol. 1255, p. 202-206. [<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.04.001>]
- STATHEROPOULOS, M., AGAPIOU, A., ZORBA, E., *et al.* (2011) Combined chemical and optical methods for monitoring the early decay stages of surrogate human models. *Forensic Science International* vol. 210, n° 1-3, p. 154-163. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.023>]
- STEJSKAL, S.M. (2012) Death, decomposition, and detector dogs, from science to scene. Boca Raton, Floride, CRC Press.
- TIPPLE, C.A., CALDWELL, P.T., KILE, B.M., *et al.* (2014) Comprehensive characterization of commercially available canine training aids. *Forensic Science International* vol. 242, p. 242-254. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.06.033>]
- TITUS, K.C., GALLEGOS, S.F., PRADA-TIEDEMANN, P.A. (2022) Forensic odor analysis: current application in postmortem examinations. *Research and Reports in Forensic Medical Science* vol. 12, p. 1-12. [<https://doi.org/10.2147/RRFMS.S272225>]
- VADUREL, A., GOGNY, M. (1997) L'odorat du chien : aspects physiologiques et facteurs de variation. *Le Point vétérinaire* vol. 28, n° 181, p. 1037- 1044.
- VASS, A.A. (2012) Odor mortis. *Forensic Science International* vol. 222, n° 1-3, p. 234-241. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.06.006>]
- VASS, A.A., SMITH, R.R., THOMPSON, C.V., *et al.* (2008) Odor analysis of decomposing buried human remains. *Journal of Forensic Sciences* vol. 53, n° 2, p. 384-391. [<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00680.x>]
- VERHEGGEN, F., PERRAULT, K.A., MEGIDO, R.C., *et al.* (2017) The odor of death: an overview of current knowledge on characterization and applications. *BioScience* vol. 67, n° 7, p. 600-613. [<https://doi.org/10.1093/biosci/bix046>]
- WEI, Q., ZHANG, H., MA, S., *et al.* (2016) Sex- and age-related differences in c-fos expression in dog olfactory bulbs. *Acta Zoologica* vol. 98, n° 4, p. 370-376. [<https://doi.org/10.1111/azo.12178>]

- WILLIAMS, M., JOHNSTON, J.M. (2002) Training and maintaining the performance of dogs (*Canis familiaris*) on an increasing number of odor discriminations in a controlled setting. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 78, n° 1, p. 55-65. [[https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(02\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(02)00081-3)]
- WILSON, A.S., JANAWAY, R.C., HOLLAND, A.D., *et al.* (2007) Modelling the buried human body environment in upland climes using three contrasting field sites. *Forensic Science International* vol. 169, n° 1, p. 6-18. [<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.07.023>]
- WILSON, D.A., STEVENSON, R.J. (2003) The fundamental role of memory in olfactory perception. *Trends in Neurosciences* vol. 26, n° 5, p. 243-247. [[https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00076-6)]
- WILSSON, E., SINN, D.L. (2012) Are there differences between behavioral measurement methods? A comparison of the predictive validity of two ratings methods in a working dog program. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 141, n° 3-4, p. 158-172. [<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2012.08.012>]
- WOIDTKE, L., CRISPINO, F., FERRY, B., *et al.* (2023) The use of mantrailing dogs in police and judicial context, future directions, limits and possibilities – A law review. *Forensic Science International: Synergy* vol. 7, n° 100439. [<https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100439>]
- YOUNGENTOB, S.L., KENT, P.F. (1995) Enhancement of odorant-induced mucosal activity patterns in rats trained on an odorant identification task. *Brain Research* vol. 670, n° 1, p. 82-88. [[https://doi.org/10.1016/0006-8993\(94\)01275-M](https://doi.org/10.1016/0006-8993(94)01275-M)]
- ZARZO, M. (2007) The sense of smell: molecular basis of odorant recognition. *Biological Reviews* vol. 82, n° 3, p. 455-479. [<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00019.x>]

Annexe 1

Résumé des composés organiques volatils détectés dans les aides au dressage des chien (d'après Dargan et Forbes, 2021)

Compounds	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse	
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
Acids and esters														
Acetic acid					X							X		
Methyl acetate					X				X					
Ethyl acetate			X											
Isobornyl acetate			X									X		
2-(2-butoxyethoxy)ethyl acetate			X											
4-tert-Butylcyclohexyl acetate			X											
Propanoic acid	X				X		X	X	X					
2-Methylpropanoic acid					X							X		
Ethyl propionate						X	X							
Propyl propionate						X	X							
2-Methyl-1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl propionate													X	
Butanoic acid	X				X	X		X	X					
2-Methylbutanoic acid					X									
3-Methylbutanoic acid					X									
Methyl butanoate									X			X		
Ethyl 3-methylbutanoate						X								
Ethyl butanoate						X		X	X					
Propyl butanoate						X	X		X					
Butyl butanoate							X	X	X					
Pentanoic acid					X		X	X	X					
Ethyl pentanoate						X	X							
Hexanoic acid	X							X	X			X		
2-Methylhexanoic acid					X									
2-Ethylhexanoic acid												X		
Ethyl hexanoate	X							X						
Pentyl hexanoate								X						
Heptyl hexanoate								X	X					
Octanoic acid												X		
Undecanoic acid								X	X					
Methyl decanoate			X						X					
Methyl 10-methylundecanoate												X		
Methyl dodecanoate			X											
Methyl tridecanoate			X						X					
Methyl tetradecanoate			X											
Methyl 14-methylpentadecanoate			X											
Methyl hexadecanoate									X		X			

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse		
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2016)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
Benzoic acid					X										
2-Methylpropyl benzoate		X													
Methyl 2-hydroxybenzoate			X										X		
Homomenthyl salicylate			X												
Hexyl 2-hydroxybenzoate			X												
2-Ethylhexyl tetradecyl oxalate													X		
Diethyl phthalate											X				
[2,2,4-Trimethyl-3-(2-methylpropanoiloxy)pentyl] 2-methylpropanoate			X												
Methyl dihydrojasmonate			X												
Aldehydes															
Acetaldehyde	X								X			X			
Butanal									X			X			
2-Methyl butanal									X			X			
3-Methyl butanal					X				X			X			
Pentanal									X			X			
2-Hexenal								X	X						
Hexanal								X	X			X		X	
Heptanal	X	X						X	X			X		X	
2-Heptenal		X						X							
2,4-Heptadienal								X	X						
Octanal	X							X	X			X		X	
2-Octenal								X	X						
Nonanal	X	X						X	X				X		
2-Nonenal								X							
2,4-Nonadienal								X	X						
Decanal											X		X		
Benzaldehyde	X							X	X	X			X		
Furfuraldehyde													X		
Halogen compounds															
Chloroform															
Carbon tetrachloride															
Dichlorodifluoromethane												X			
Dichlorotetrafluoromethane												X			
Trichloromonofluoromethane												X			
Trichloroethane															
Trichloroethylene	X											X			
Trachloroethylene						X						X	X		
1,2-Dichloroethene												X			
1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroethane												X			

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse	
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
1,1-Dichloro-1-fluoroethane											X			
1-Chloro-2-methoxy-benzene										X				
Compounds														
Alcohols														
Ethanol	X						X		X					
2-(2-Methoxyethoxy)ethanol											X			
2-(2-Ethoxyethoxy)ethanol				X									X	
2-(Hexyloxy)ethanol				X										
2-Butoxyethanol											X		X	
1-Propanol	X				X						X			
2-Methyl-1-propanol							X	X		X	X			
2-Propanol					X									
1-(1-Methoxypropan-2-yloxy)propan-2-ol			X											
1-Butanol							X	X		X			X	
2-Butanol							X							
2-Methyl-1-butanol							X	X						
3-Methyl-1-butanol					X		X	X		X				
1-Pentanol									X	X			X	
2-Methyl-1-pentanol										X				
2-Methyl-3-pentanol										X				
2,2,4-trimethyl-3-penten-1-ol		X												
1-Hexanol						X			X	X				
3-Hexanol													X	
2-Ethylhexanol						X		X	X	X	X		X	
3-Heptanol													X	
3-Heptenol		X												
3-Methyl-3-heptanol													X	
3-Ethyl-3-heptanol													X	
1-Butoxy-2-propanol			X											
1-Octanol						X			X	X	X			
3-Octanol										X			X	
3-Octenol	X					X			X	X				
3-Ethyl-1-octanol													X	
2-Hexyl-1-octanol											X			
3,7-dimethyl-3-octanol			X											
2,6-dimethyl-7-octan-2-ol			X								X			
3,7-dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool)			X											
Furfuryl alcohol											X			

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis			Textile		Formulations de synthèse	
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2016)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
2-Pentadecyn-1-ol													X		
1-Hexyl-1-decanol													X		
2-Methyl-1-undecanol			X												
1-Undecanol			X												
2-Decanol			X												
1-Phenoxy-2-propanol			X												
2-Phenyl ethanol					X										
Benzyl alcohol									X				X		
Phenol		X			X				X				X	X	
4-Methylphenol					X										
4-Isopropenylphenol				X											
4-Ethyl-1,3-benzenediol														X	
2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)phenol														X	
4-(1,1-dimethylpropyl)phenol					X										
2-Phenyl-2-propanol (Cumyl alcohol)											X				
5-methyl-2-propan-2-ylcyclohexan-1-ol(Menthol)			X										X		
Ketones															
Acetone									X					X	
Acetophenone			X		X				X						
2-Propanone						X			X		X				
2-Butanone	X				X		X		X		X			X	
2-Pentanone					X		X								
3-Pentanone									X						
3-Methyl-2-pentanone														X	
4-Methyl-2-pentanone														X	
3-Ethyl-2-pentanone														X	
2-dimethyl-4-pentyn-3-one				X											
2-Hexanone									X						
3-Hexanone									X					X	
5-Methyl-2-hexanone		X													
3-Methyl-2-hexanone									X						
4-Methyl-3-hexanone									X	X					
5-Methyl-3-hexanone									X						
2-Heptanone								X						X	
3-Heptanone									X					X	
3-Methyl-2-heptanone									X						
4-Methyl-2-heptanone				X											
6-Methyl-5-heptene-2-one													X		
1-Octen-3-one		X													
2-Nonanone		X							X					X	
2-Decanone														X	

	Sang		Restes humains et fluides de décomposition					Sol et vestiges enfouis			Textile		Formulations de synthèse	
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
2-Tetradecanone			X											
1-[4-(1-Hydroxy-1-methylethyl)phenyl] ethanone												X		
1,3,3-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-one (Fenchone)		X												
6,10-dimethylundeca-5,9-dien-2-one (Geranyl acetone)												X		
3-methyl-6-propan-2-ylcyclohex-2-en-1-one (Piperitone)		X												
2-Piperidione					X									
3-methyl-4-(2,6,6-trimethylcyclohex-2-en-1-yl)but-3-en-2-one (Isomethyl ionone)			X											
2-Oxolanone (Butyrolactone)				X									X	
1-(4-hydroxyphenyl)ethanone				X										
Cyclohexanone	X	X			X	X		X						
Benzophenone												X		
Compounds														
Cyclic hydrocarbons														
Methylcyclopentane		X												
(2-Methylpropyl)cyclohexane				X										
Benzene								X		X				
Toluene	X					X		X		X	X			
Ethylbenzene								X	X	X				
Propylbenzene			X											
1-Methyl-3-propyl benzene			X											
1-Methyl-4-propyl benzene			X											
1-Methoxypropyl benzene										X				
(1-Methyldecyl)benzene				X										
1,2-Dimethyl benzene (O-Xylene)										X				
1,4-Dimethyl benzene (P-Xylene)						X		X	X	X				
1-Ethyl-2-methyl benzene										X				
1-Ethyl-3-methyl benzene			X											
2-Ethyl-1,3-dimethyl benzene			X											
2-Ethyl-1,4-dimethyl benzene			X											
4-Ethyl-1,2-dimethyl benzene			X											
(1-Ethylonyl)-benzene			X											
(1-Pentylheptyl)-benzene				X										
1,2,4-Trimethylbenzene			X											
1,2,3-Trimethylbenzene			X											
1,2,3,4-Tetramethylbenzene			X								X			
1,3-Bis(1,1-dimethylethyl)-benzene												X		
Naphthalene								X		X	X			
1-Methyl naphthalene								X						

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse		
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2016)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
Styrene									X		X	X			
Cumene			X												
1,4-Dioxane														X	
Alpha-pinene			X						X						
Terpinolene										X					
2-Methyl furan									X		X				
2,4-Dimethyl furan														X	
2-Butyl furan									X						
2-Pentyl furan	X	X			X			X	X						
Butylcyclohexane			X												
Propylcyclohexane			X												
5-Phenylundecane			X												
Non Cyclic Hydrocarbons															
2-Methylbutane											X				
3-Methylbutane							X								
Pentane			X		X		X		X		X				
3-Methylpentane															
2-Methylpentane											X				
2,4,4-Trimethylpentane		X													
4-Methyl-2-pentene									X						
1,3-Pentadiene									X						
Hexane	X				X				X		X				
1-Hexene									X						
3-Ethylhexane			X												
Heptane					X				X		X			X	
Octane		X			X				X		X			X	
2-Octene									X						
3-Octene									X						
4-Ethyl-octane			X												
2,5-Dimethyloctane							X								
2,6-Dimethyloctane			X												
2,4,6-Trimethyloctane				X											
Nonane			X						X		X				
2-Methylnonane			X				X								
Decane	X	X	X					X	X		X				
Undecane			X					X	X		X	X			
Tridecane			X		X				X			X			
Tetradecane			X						X			X		X	
Pentadecane					X							X			
Hexadecane			X						X			X			
Heptadecane			X	X					X			X			
3-Ethyl-2-methyl-heptane											X				

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse		
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2016)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(DeGreeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
2-Methyl-3-heptene				X											
4-Methyldecane			X												
Dodecane			X							X					
2,6,10,14-Tetramethylheptadecane			X												
1-Propene															
2-Methylpropene												X			
2-Pentene												X			
3,4,4-Trimethyl-2-pentene				X											
2,6-Dimethyl-2,6-octadiene		X													
3-Decene			X												
Icosane					X										
Compounds															
Sulphur compounds															
Carbon disulphide	X							X		X		X			
Carbon oxide sulphide												X			
Sulphur dioxide					X					X		X			
Methanethiol								X							
3-Methylthio-1-propanol								X							
Dimethyl sulphide												X			
Dimethyl disulphide	X				X	X	X		X	X		X			
Dimethyl trisulphide					X					X		X	X		
Diethyl disulphide							X	X							
Methyl(methylthio)ethyl disulphide							X	X							
Methylisobutyl disulphide								X							
Methylhexyl disulphide								X							
Methylethyl disulphide								X		X					
Methylisopropyl disulphide								X							
Methyl allyl disulphide												X			
1-Methylthioheptane								X							
Methylthiopentane															
Benzothiazole										X				X	
Nitrogen compounds															
Methanamine					X					X		X			
Trimethylamine					X										
Tridecylamine															X
1,4-Diaminobutane (Putrescine)															X
1,5-Diaminopentane (Cadaverine)															X
2,5-Dimethyl-1-pyrrole							X								
Pyridine							X	X		X					
2,6-Dimethylpyridine							X								

	Sang				Restes humains et fluides de décomposition				Sol et vestiges enfouis		Textile		Formulations de synthèse		
	(Rendine et al., 2019)	(Chilcote, Rust, Nizio, & Forbes, 2018)	(Rust, Nizio, Wand, & Forbes, 2018)	(Rust et al., 2016)	(Forbes & Perrault, 2014)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	(Rosier et al., 2016)	(Rosier et al., 2015)	(Hoffman, Curran, Dulgerian, Stockham, & Eckenrode, 2009)	Buis (2015)	(Dubois, Stefanuto, Heudt, Focant, & Perrault, 2018)	(Vass, 2012)	(De Greeff & Furton, 2011)	(Tipple et al., 2014)	(Stadler et al., 2012)
2,4,6-Trimethylpyridine															X
2,5-Dimethylpyrazine								X							
2,6-Dimethylpyrazine					X										
2,3,5-Trimethylpyrazine								X							
2,3,5,6-Tetramethylpyrazine								X							
2-Pyrrolidone															X
Aniline		X													
Benzonitrile					X								X		
Methoxy phenyl oxime		X									X		X		
Nitroso methane										X					
N,N-Dibutylformamide		X		x											
N-Formyl-N-methylformamide		X													
4-Aminobutanoic acid (GABA)															X
1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene (DBU)															X
Indole	X				X	X			X	X					

Note: X Composés significatifs sur les surfaces poreuses dans l'étude de Chilcote et al. (2018) X Composés significatifs sur les surfaces non poreuses dans l'étude de Chilcote et al. (2018).
 **COV dans la formulation synthétique détectés par la méthode SPME

Annexe 2

Sous-test	Évaluation	1	2	3	4	5
Affabilité et manipulation	Affabilité	Rejette le contact, se retire	Ne rejette pas le contact, pas de retrait	Ne rejette pas le contact, pas de retrait. Prend contact pendant 15 sec.	Prend contact spontanément pendant 15 sec sans sauter ni vocaliser	Contact intensif avec vocalises et sauts sur la personne
	Manipulation	Rejette, grogne, essaie de mordre/s'échapper	S'éloigne, cherche le soutien du maître	Accepte la manipulation	Accepte la manipulation, contact avec responsable	Contact exagéré avec le responsable quand manipulé
Laisse	Laisse	Agit par lui-même, aucun contact avec le maître	Agit par lui-même, attention aux demandes du maître	Suit sans ordre du maître	Cherche la confirmation du gestionnaire	
Tir-à-la-corde	Tir-à-la-corde	Ne prend pas le chiffon	Prend le chiffon. Lache quand le maître le tire	Prend le chiffon. Lache quand le maître le tire	Tire fort mais lâche quand le maître tire fort ou fait des sons forts	Tire fort. Ne lâche pas malgré résistance ou perturbations sévères
Récupération	Chasse	Ne court pas après la balle	Commence à courir mais s'arrête avant d'atteindre la balle	Court après et prend la balle	Court après et rapporte la balle au maître	Court après avec grande intensité et rapporte la balle au maître
	Intérêt pour un objet	Ne prend pas la balle	Prend la balle mais s'en va immédiatement	Prend la balle mais la tient moins de 5 sec	Prend la balle et la tient	Prend la balle intensément et la tient
Pièce sombre	Réaction dans la pièce	Tente de quitter la pièce	S'arrête quand la lumière s'éteint	Marche dans la pièce moins de 3m et s'arrête	Recherche mais semble troublé. Va au maître avec de l'aide	Recherche sans hésitation ou trouve le maître directement
Escalier en métal	Escalier en métal	Refuse de suivre le maître	Commence par suivre puis refuse après quelques pas	Parcourt tout l'escalier mais avec beaucoup d'hésitation	Descend facilement l'escalier mais avec hésitation.	Descend facilement l'escalier sans hésitation.
Table instable	Réaction sur la table	Essaye de s'échapper avant que la table ne bouge	Essaye de s'échapper quand la table bouge	Visiblement mal à l'aise mais n'essaie pas de s'échapper.	Tendu mais non agacé	Non affecté. Le chien reste immobile pendant que la table bouge
	Objet	Ne prend pas la balle	Prend la balle mais s'en va quand la table bouge	Prend la balle malgré la table qui bouge		
Sursaut acoustique	Distance du sursaut	S'échappe > 5m	S'échappe 2-5m	S'échappe 1-2m	Un ou deux pas en arrière sans s'échapper	Pas de réponse de peur
	Réponse secondaire	Ne veut pas enquêter malgré les encouragements	Enquête seulement si forts encouragements	Approche l'objet avec quelques encouragements	Approche l'objet sans aide mais avec hésitation	Approche l'objet sans hésitation
	Effet persistant	Très affecté, évitement persistant	Affecté, passe devant mais évitement	Moyennement affecté, change de posture en passant	Non affecté, regarde l'objet en passant	Aucun effet
Sursaut visuel	Distance du sursaut	S'échappe > 5m	S'échappe 2-5m	S'échappe 1-2m	Tremblements sans échappement	Pas de réponse de peur
	Aggression	Aucun signe d'agression, aboiement ou grognements	Quelques signes d'agression, aboiement ou grognements	Signes d'agression clairs, aboiement piloerection	Signes d'agression forts, grognements, sort les crocs	Attaque et mord l'objet
	Réponse secondaire	N'approche pas l'objet	Approche l'objet avec beaucoup d'encouragements	Approche l'objet avec quelques encouragements	Approche l'objet sans aide mais avec hésitation	Approche l'objet sans hésitation
	Effet persistant	Très affecté, évite l'objet	Affecté, passe devant mais évitement	Moyennement affecté, change de posture en passant	Non affecté, regarde l'objet en passant	Aucun effet
Sursaut visuel progressif	Peur	Peur, essaie de s'échapper	Pas de réaction	Hésite entre attaque et fuite.	Forte réaction d'attaque, mais sans attaque directe.	Attaque et mord la silhouette
	Aggression	Aucun signe d'agression, aboiement ou grognements	Quelques signes d'agression, aboiement ou grognements	Signes d'agression clairs, aboiement piloerection	Signes d'agression forts, grognements, sort les crocs	Mord
	Réponse secondaire	N'approche pas de la silhouette	Approche la silhouette avec des encouragements	Approche la silhouette avec quelques encouragements	Approche la silhouette sans aide mais avec hésitation	Approche la silhouette sans hésitation
Recherche	Effet persistant	Très affecté. Évitement persistant de la silhouette	Affecté. Passe devant mais évitement	Moyennement affecté. Changement de posture en passant	Non affecté mais l'objet en passant	Pas d'effet
	Intensité	Ne cherche pas	Cherche mais s'arrête	Cherche vers différentes directions	Cherche intensément, utilise sa bouche ou ses pattes	Cherche intensément, utilise sa bouche et ses pattes
	Persistence	Ne cherche pas	Cherche < 10s	Cherche < 1 min	Cherche < 2 min	Cherche < 2 min
Coups de feu	Peur	Très peureux, essaie de fuir en laisse	Arrête de jouer, ne joue plus après	Arrête de jouer, ne vient plus au contact pour jouer	Pas de réaction	
	Curiosité	Pas de réaction	Arrête de jouer, regarde en direction de l'arme	Arrête de jouer, tire sur la laisse en direction du coup de feu	Arrête de jouer, veut approcher, gémissements	Très excité, tirant sur la laisse en direction des coups de feu, il ne peut pas être calmé.

12 sous-tests utilisés pour réaliser des évaluations comportementales (d'après Wilsson et Sinn, 2012)

Annexe 3

Liste des composés de l'odeur de la mort et des variables taphonomiques pertinentes jugées importantes pour la localisation et l'interprétation des restes humains (d'après Vass, 2012)

Composé	Emplacement les plus communs du composé dans les sols	Intervalle de temps approximatif en années où le composé est le plus couramment détecté	Phase de décomposition où le composé a le plus de chance d'être présent	Conditions du sol les plus favorables pour retrouver le composé	Texture du sol la plus favorable pour retrouver le composé	Environnement le plus favorable	Espèce où le composé est retrouvé	Commentaires / Observations
1,1,2-Trichloro-1,2,2-trifluoroéthane ^a	Corps / Panache odorant	0-1.5	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/chien	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
1,1-Dichloro-1-fluoroéthane ^b	Corps	0-0.8	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Anaérobic		
1,2 Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester	Corps / Panache odorant	0-2.5	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/cerf	
1,2-Dichloroéthène ^a	Panache odorant	10-20+	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon/limoneux	Aérobic/anaérobic		
1,2-Diméthyl benzène	Corps / Panache odorant	0-10 (60+)	À tout moment	Sec	Sable/argile/limoneux	Aérobic/anaérobic		S'il est sec, généralement vu tardivement dans la décomposition
1,4-Diméthyl benzène	Corps / Panache odorant	0-8 (60+)	À tout moment	Sec	Sable/argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/chien	
1-Ethyl, 2-méthyl benzène	Panache odorant	0-2.5	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Cerf	
1-Méthoxypropyl benzène	Panache odorant	0-1	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Anaérobic		
2-Butanone (méthyl éthyl ketone - MEK)	Corps	0-4 (20+)	À tout moment	Sec	Sable/limoneux	Anaérobic	Humain/cerf	Également détecté dans les cimetières
2-Méthyl butanal	Corps / Panache odorant	10-40+	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon/tourbe	Anaérobic	Humain/chien/cerf	
2-Méthyl butane	Corps / Panache odorant	2-3 (20+)	Tardif	Sec ou humide	Sable	Aérobic/anaérobic		
2-Méthyl furan ^{b,c}	Corps	0-2 (10+)	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon	Anaérobic	Cerf	
2-Méthyl pentane/3-méthyl pentane	Corps / Panache odorant	1-4 (20+)	Tardif	Sec ou humide	Sable/tourbe	Aérobic/anaérobic		
2-Méthyl propanal	Corps	10-40+	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon/tourbe	Anaérobic		
2-Méthyl propène	Panache odorant	20+	Tardif	Humide	Sable/tourbe	Anaérobic		
2-Pentène	Panache odorant	30+	Tardif	Sec ou humide	Sable	Aérobic/anaérobic		
3-Méthyl butanal	Corps / Panache odorant	10-40+	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon/tourbe	Anaérobic	Humain/cerf	Plus élevé que le 2-mébutanal dans les restes humains
Acétone (2-propanone)	Corps / Panache odorant	0.5-40+	Tardif	Sec ou humide	Sable/limon/tourbe	Aérobic/anaérobic	Humain/porc/mouton	
Benzène ^c	Corps / Panache odorant	0-4 (10+)	À tout moment	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/chien/cerf	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Benzeneméthanol- α , α , diméthyl	Corps / Panache odorant	0-2	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/chien	
Butanal	Panache odorant	10+	Tardif	Sec	Sable/argile	Aérobic	Humain/porc/cerf	
Carbon disulfide ^a	Corps / Panache odorant	0-3 (10+)	À tout moment	Sec ou humide	Sable/argile/limoneux	Aérobic/anaérobic		
Carbon oxide sulfide (COS) ^a	Corps / Panache odorant	0-2 (10+)	Tardif	Sec ou humide	Sable	Anaérobic		
Carbon tetrachloride ^a	Panache odorant	0-3	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain	S'il est sec, généralement vu tardivement dans la décomposition
Chloroforme ^a	Corps / Panache odorant	0-4 (10+)	Précoce	Sec ou humide	Sable/argile/limoneux	Anaérobic	Chien	
Decanal	Corps / Panache odorant	0-15+	À tout moment	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Humain/porc/cerf/chien	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Decane	Corps	0-1 (20+)	Tardif	Sec ou humide	Limoneux/tourbe	Anaérobic	Humain	

Composé	Emplacement les plus communs du composé dans les sols	Intervalle de temps approximatif en années où le composé est le plus couramment détecté	Phase de décomposition où le composé a le plus de chance d'être présent	Conditions du sol les plus favorables pour retrouver le composé	Texture du sol la plus favorable pour retrouver le composé	Environnement le plus favorable	Espèce où le composé est retrouvé	Commentaires / Observations
Dichlorodifluoromethane ^b	Corps / Panache odorant	0-1 (10+)	Intermédiaire	Sec ou humide	Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic	Chien/cerf	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Dichlorotetrafluoroethane ^b Dimethyl disulfide ^a	Corps / Panache odorant	0-1.5 0-3 (10+)	Précoce Intermédiaire	Sec ou humide Sec ou humide	Argile/limoneux Sable/argile/limoneux	Anaérobic Aérobic/anaérobic		Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Dimethyl sulfide Dimethyl trisulfide ^{a,d}	Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant	20+ 0-1.5	Tardif Précoce	Sec ou humide Sec ou humide	Sable Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic Aérobic/anaérobic		Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Ethanal (acetaldehyde) Ethanol Ethyl benzene	Panache odorant Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant	7-20+ 10-40+ 0-2 (10+)	Tardif Tardif Intermédiaire	Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide	Sable Sable/tourbe Argile/limoneux	Anaérobic Anaérobic Aérobic/anaérobic	Porc Porc Humain/chien	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Heptanal Heptane Hexadecanoic acid, methyl ester Hexanal Hexane	Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant Panache odorant Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant	20-40+ 1-4 (20+) 0-2 2-10+ 0-40+	Tardif Tardif Précoce À tout moment À tout moment	Humide Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide	Tourbe Sable/tourbe Argile/limoneux Sable/argile Sable/tourbe/argile/limoneux	Aérobic/anaérobic Aérobic/anaérobic Anaérobic Aérobic/anaérobic Aérobic/anaérobic	Humain/porc/cerf/chien Humain/cerf/chien Humain/porc/cerf/chien Humain/cerf	
Methane, thiobis ^a Methenamine ^a Naphthalene ^a Nonanal	Panache odorant Corps / Panache odorant Panache odorant Corps / Panache odorant	10-40+ 0-1.5 0-2 0-20+	Tardif Précoce Précoce À tout moment	Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide	Sable/tourbe Argile/limoneux Argile/limoneux Argile/limoneux	Aérobic/anaérobic Aérobic/anaérobic Anaérobic Aérobic/anaérobic	Chien Chien Humain/porc/cerf/chien	Principalement corps associé à l'âge de la tombe
Nonane Octanal Octane	Corps Panache odorant Corps	1-4 (20+) 15+ 1-40+	Tardif Tardif Tardif	Humide Sec Sec ou humide	Tourbe Sable/argile Sable/tourbe	Anaérobic Aérobic/anaérobic Anaérobic	Humain/cerf Humain/porc/cerf Humain/chien/cerf	S'il est sec, généralement vu tardivement dans la décomposition
Pentanal Pentane	Panache odorant Corps	2-40+ 1-40+	À tout moment Tardif	Sec Sec ou humide	Tourbe Tourbe/limon	Aérobic/anaérobic Anaérobic	Humain/porc/cerf/chien Humain	S'il est sec, généralement vu tardivement dans la décomposition
Styrene	Corps / Panache odorant	0-2	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Anaérobic		S'il est sec, généralement vu tardivement dans la décomposition
Sulfur dioxide ^a	Corps / Panache odorant	0-3	Précoce	Sec ou humide	Argile/limoneux	Anaérobic		
Tetrachloroethene ^a Toluene (methyl benzene) ^b Trichloroethylene ^a Trichloromonofluoromethane ^b Undecane	Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant Panache odorant Corps / Panache odorant Corps / Panache odorant	0-5 (~10) 0-100+ 0-1 0-12+ 0-4	Précoce Tardif Précoce Intermédiaire Précoce	Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide Sec ou humide	Sable/argile/limoneux Sable/limon/argile/limoneux Argile/limoneux Sable/argile/limoneux Argile/limoneux	Anaérobic Aérobic/anaérobic Anaérobic Anaérobic Aérobic/anaérobic	Cerf/chien Humain/chien/cerf Chien/cerf Humain	Également identifié dans les cendres

^a Densité > 1.0

^b Non visible chez les enfants < 4 ans (n=3)

^c D'autres formes substituées sont également observées (par exemple, le 1,4-dichlorobenzène).

^d Le tétrasulfure de diméthyle est également présent au début de la décomposition humaine.

^e Un sol sec est défini comme un sol dont la teneur en eau est inférieure à 50 % (en poids), un sol humide est un sol dont la teneur en eau est supérieure à 50 %.

LA CONTRIBUTION DE L'OLFACTION CANINE À LA DÉTECTION ET LOCALISATION DE RESTES HUMAINS

AUTEUR : Caroline KSIONKOWSKI

RÉSUMÉ :

L'olfaction canine est un atout précieux pour les forces de l'ordre et les équipes de secours. Dans des circonstances accidentelles ou criminelles, des recherches peuvent être menées afin de retrouver des restes humains, permettant ainsi aux familles des victimes de faire leur deuil et/ou d'aider à appréhender un suspect.

L'étude de l'anatomie du nez du chien ainsi que la physiologie de l'olfaction permettent d'expliquer, en partie, par quel moyen les chiens sont capables de capter des odeurs à des concentrations extrêmement faibles et d'interpréter une grande variété de stimuli odorants dans des environnements olfactifs complexes. Ce sens unique est mis à contribution dans une variété d'applications humaines dont la recherche de restes humains.

Le Groupe National d'Investigation Cynophile de la Gendarmerie est la seule unité française spécialisée dans la recherche de restes humains. Les chiens de cette unité sont capables d'identifier les composés organiques volatils produits lors de la décomposition humaine, même dans des conditions difficiles. La formation est assurée par des maîtres-chiens expérimentés grâce à différentes aides disponibles. Malgré un travail éprouvant, des aspects juridiques flous et des données scientifiques peu disponibles, ces binômes font preuve d'une efficacité incomparable.

Afin de mener au mieux ces recherches, il est primordial de connaître les facteurs de variations pouvant influencer l'acuité olfactive du chien. Tout d'abord, des facteurs individuels tels que le choix de la race, le tempérament ou l'attrait au jeu permettent d'optimiser la sélection des jeunes chiens. Des facteurs environnementaux tels que la température, les précipitations ou la pression atmosphérique peuvent avoir un impact direct sur la physiologie de l'olfaction. Enfin de très nombreux facteurs humains sont à prendre en compte. Des composés organiques volatils sont produits lors de la décomposition d'un corps humain et permettent la localisation des corps. Ces composés organiques volatils peuvent être modifiés par de très nombreux critères individuels ou environnementaux. La prise en compte de ces multiples paramètres est donc cruciale pour les enquêtes médico-légales, la recherche des disparus et les interventions en conditions extrêmes.

MOTS CLÉS : Chien ; Cynotechnie ; Restes Humains ; Olfaction

JURY :

Président : Pr Alain Fontbonne

Directeur de thèse : Pr Stéphane Blot

Examineur : Pr Gregory Jouvion

Invité co-encadrant : Pr Dominique Grandjean

THE CONTRIBUTION OF CANINE OLFACTION TO THE DETECTION AND LOCALIZATION OF HUMAN REMAINS

AUTHOR: Caroline KSIONKOWSKI

SUMMARY:

Canine olfaction is a valuable asset for law enforcement and rescue teams. In accidental or criminal circumstances, searches can be conducted to find human remains, thereby allowing the victims' families to find closure and/or help apprehend a suspect.

The study of the dog's nose anatomy and the physiology of olfaction partly explains how dogs are able to detect odors at extremely low concentrations and interpret a wide variety of scent stimuli in complex olfactory environments. This unique sense is used in various human applications, including the search for human remains.

The National Canine Investigation Group of the Gendarmerie is the only French unit specialized in the search for human remains. The dogs of this unit can identify volatile organic compounds produced during human decomposition, even in challenging conditions. Training is provided by experienced handlers using various tools and alternatives available on the market. Despite challenging work, unclear legal aspects, and a lack of reliable scientific data, these teams demonstrate unparalleled effectiveness.

To conduct these searches optimally, it is essential to understand the factors that can influence a dog's olfactory acuity. First, individual factors such as breed selection, temperament, or play drive optimize the selection of young dogs. Environmental factors such as temperature, precipitation, or atmospheric pressure can have a direct impact on the physiology of olfaction. Finally, numerous human factors must be considered. Volatile organic compounds are produced during the decomposition of a human body and allow for the location of remains. These volatile organic compounds can be altered by many individual or environmental factors. Considering these multiple parameters is therefore crucial for forensic investigations, the search for missing persons, and operations in extreme conditions.

KEYWORDS: Dog; Cynotechny; Human Remains; Olfaction

JURY:

Chairperson: Pr Alain Fontbonne

Thesis Director: Pr Stéphane Blot

Reviewer: Pr Gregory Jouvion

Guest: Pr Dominique Grandjean