

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 087

ESSAI DE MISE AU POINT D'UNE METHODE D'ETUDE
DES PHENOMENES DE COMPENSATION OLFACTIVE
CHEZ LE DALMATIEN SOURD

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 4 novembre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

CHALARD Clément

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2022 - Thèse n° 087

ESSAI DE MISE AU POINT D'UNE METHODE D'ETUDE
DES PHENOMENES DE COMPENSATION OLFACTIVE
CHEZ LE DALMATIEN SOURD

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 4 novembre 2022
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

CHALARD Clément

Liste des enseignants du Campus Vétérinaire de Lyon (14-09-2022)

Pr	ABITBOL	Marie	Professeur
Dr	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Pr	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Dr	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Dr	BECKER	Claire	Maître de conférences
Dr	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Dr	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
Pr	BENOIT	Etienne	Professeur
Pr	BERNY	Philippe	Professeur
Pr	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Professeur
Dr	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
Dr	BRUTO	Maxime	Maître de conférences
Dr	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
Pr	BUFF	Samuel	Professeur
Pr	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
Dr	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
Pr	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Pr	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
Pr	CHABANNE	Luc	Professeur
Pr	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
Dr	CHAMEL	Gabriel	Maître de conférences
Dr	CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Dr	DEBOYERDESROCHES	Alice	Maître de conférences
Pr	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Pr	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Dr	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
Dr	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
Dr	GALIA	Wessam	Maître de conférences
Pr	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
Dr	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Dr	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Dr	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Dr	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	JUNOT	Stéphane	Professeur
Pr	KODJO	Angeli	Professeur
Dr	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Dr	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Dr	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Pr	LEGRAND	Dominique	Professeur
Pr	LEBLOND	Agnès	Professeur
Dr	LEDOUX	Dorothee	Maître de conférences
Dr	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Dr	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
Dr	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
Pr	LEPAGE	Olivier	Professeur
Pr	LOUZIER	Vanessa	Professeur
Dr	LURIER	Thibaut	Maître de conférences
Dr	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
Pr	MARCHAL	Thierry	Professeur
Dr	MOSCA	Marion	Maître de conférences
Pr	MOUNIER	Luc	Professeur
Dr	PEROZ	Carole	Maître de conférences
Pr	PIN	Didier	Professeur
Pr	PONCE	Frédérique	Professeur
Pr	PORTIER	Karine	Professeur
Dr	POUZOT-NEVORET	Céline	Maître de conférences
Pr	PROUILLAC	Caroline	Professeur
Pr	REMY	Denise	Professeur
Dr	RENEMARTELLET	Magalie	Maître de conférences
Pr	ROGER	Thierry	Professeur
Dr	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
Pr	SCHRAMME	Michael	Professeur
Pr	SERGENTET	Delphine	Professeur
Dr	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Dr	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
Pr	VIGUIER	Eric	Professeur
Dr	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothee	Chargé d'enseignement contractuel
Pr	ZENNER	Lionel	Professeur

REMERCIEMENTS À DESTINATION DU JURY

A Monsieur le Professeur François MION
De l'Université Claude Bernard Lyon 1, Faculté de médecine de Lyon
Pour avoir accepté de présider ce jury de thèse,
Hommages respectueux.

A Madame la Directrice de recherche Barbara FERRY
Du Centre National de Recherche Scientifique (UMR 5292)
Pour la rigueur, le sourire et la bienveillance,
Un grand merci.

A Monsieur le Professeur Mathieu MAGNIN
De VetAgro Sup, Campus Vétérinaire de Lyon
Pour l'efficacité, la jeunesse et les conseils précieux,
Merci beaucoup.

A Madame la Professeure Jeanne-Marie BONNET
De VetAgro Sup, Campus Vétérinaire de Lyon
Pour avoir accepté de faire partie de ce jury, pour tout ce que vous êtes,
Un profond respect.

A Monsieur le Professeur retraité Jean-Jacques THIEBAULT
De VetAgro Sup, Campus Vétérinaire de Lyon
Pour m'avoir suivi et encouragé tout au long de ce travail, pour la simplicité,
Encore merci.

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	9
TABLE DES ANNEXES	15
TABLE DES FIGURES	17
TABLE DES TABLEAUX	21
LISTE DES ABREVIATIONS	23
INTRODUCTION	25
PREMIERE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	27
I. HISTORIQUE	29
A. Domestication du chien	29
B. Utilisation du chien.....	30
1) Utilisations ancestrales	30
2) Utilisations actuelles dans la quête d’odeurs.....	31
II. LE SYSTEME OLFACTIF DU CHIEN	32
A. Anatomo-histologie	32
1) Le nez.....	32
2) Les cavités nasales	34
3) Les sinus para nasaux	36
4) La muqueuse olfactive.....	36
5) Le bulbe olfactif (4).....	38
6) Centres olfactifs secondaires et supérieurs.....	40
7) Système olfactif accessoire	41
B. Physiologie	43
1) La molécule odorante.....	44
2) Cheminement vers l’appareil olfactif et dissémination.....	45

3) Perception de l'odeur	48
a. Réception	48
b. Transduction	50
c. Transmission	52
C. Caractéristiques de la fonction olfactive	53
1) Seuil de perception.....	54
2) Temps de latence.....	54
3) Variations d'intensité	54
4) Adaptation et fatigue	55
5) Persistance	55
D. Acuité olfactive du chien : facteurs de variation	56
1) Individuels.....	56
a. Espèce.....	56
b. Race	57
c. Individu	60
2) Physiologiques	61
a. La nutrition.....	61
b. L'âge	62
c. Le sexe	63
d. La condition physique.....	63
3) Environnementaux	64
a. La météo.....	64
b. La pollution	65

4) Iatrogènes	66
III. CHOIX DU MODELE	67
A. Dalmatien et surdité neurosensorielle congénitale	68
1) Anatomie de l'oreille	68
a. Externe	68
b. Moyenne	69
c. Interne.....	70
d. Cas du dalmatien sourd	71
2) Histologie de l'oreille.....	72
a. Organe de Corti.....	72
b. Strie vasculaire.....	73
c. Cas du dalmatien sourd	75
3) Physiologie de l'oreille	77
a. De l'oreille externe vers le cortex auditif	77
b. Physiopathologie de la surdité du dalmatien.....	83
4) Le diagnostic de certitude : les Potentiels Evoqués Auditifs	85
a. Matériel et méthode	86
b. Déroulement.....	88
c. Interprétation	89
B. La formation du chien au travail olfactif : exemple du chien de recherche de mat�res	91
1) L'acquisition de la faculté de recherche	92
a. Fanatisation	92
b. Créancement.....	93

c.	Simulacre de poses	94
d.	Marquage	94
2)	Progression et difficultés.....	96
a.	Cache à l'insu	96
b.	Substitution.....	96
3)	Contrôle et maintien de l'apprentissage	97
C.	Hypothèse de travail.....	98
1)	Plasticité cérébrale	98
2)	Compensation sensorielle	99
3)	Modèle proposé.....	101
	DEUXIEME PARTIE : ÉTUDE PERSONNELLE	103
	INTRODUCTION	105
I.	MATERIEL ET METHODES	105
II.	RESULTATS.....	114
A.	Groupe sourd	115
B.	Groupe entendant :	115
C.	En résumé.....	117
III.	DISCUSSION	117
A.	Tempérament et traits de caractère des chiens :	118
B.	Efficacité du binôme maître/chien.....	121
C.	Fréquence et environnement d'entraînement :.....	122
D.	Molécules utilisées.....	124
E.	En résumé.....	125
	CONCLUSION	127

BIBLIOGRAPHIE.....	129
ANNEXES	143

Table des annexes

Annexe 1 : Dépliant utilisé lors de la phase de recrutement des chiens	143
Annexe 2 : Brochure explicative concernant les polymères utilisés pour l'imprégnation des boudins de jeu	145

Table des figures

Figure 1 : Du loup aux chiens (Porteau, 2018)	30
Figure 2 : Représentation schématique de la truffe d'un chien (Barone, 1997)	33
Figure 3 : Schéma de la charpente cartilagineuse des narines d'un chien (Barone, 1984)	33
Figure 4 : Cavité nasale du chien en coupe sagittale (Barone, 1997)	34
Figure 5 : Coupe transversale des cornets et méats nasaux d'un chien (Chatelain, 2005)	35
Figure 6 : Labyrinthe ethmoïdal d'un chien en coupe transversale (Kroely, 2011)	35
Figure 7 : Représentation schématique des sinus chez le chien (Chatelain, 2005)	36
Figure 8 : Coupe sagittale de la cavité nasale droite d'un chien (D'après Craven et al., 2010)	37
Figure 9 : Schématisation d'une coupe en trois dimensions de la muqueuse olfactive (Buron, 2009).....	38
Figure 10 : Représentation schématique en coupe transversale des 7 couches du bulbe olfactif (Barone, 2004).....	40
Figure 11 : Représentation des projections centripètes du bulbe olfactif (Crédit image : vetopsy.fr)	41
Figure 12 : Schématisation en coupe sagittale de l'organe voméro-nasal (Pageat, 1997).....	42
Figure 13 : Organisation générale du système olfactif accessoire chez le rongeur (D'après Brennan et Zufall, 2006).....	43
Figure 14 : Exemple de formules chimiques et leurs odeurs associées (Source image : Les propriétés des molécules odorantes – TPE La reconnaissance des odeurs [Internet]).....	45
Figure 15 : Les différentes voies pour le courant aérien (Zographos, 2017)	46
Figure 16 : Mise en mouvement des particules lors du reniflement (Settle et al., 2003)	47
Figure 17 : Orientation des flux d'air entrant et sortant (Crédit Image : CHALARD Clément). 47	
Figure 18 : Représentation schématique de la muqueuse olfactive (Holley, 1975)	48

Figure 19 : Représentation schématique d'un RCPG (Crédit Image : PHARMACOMédicale.org [Internet])	48
Figure 20 : Les liaisons non spécifiques entre odotopes et récepteurs (Ache et Young, 2005)	50
Figure 21 : Les deux voies de transduction du système olfactif (Crédit Image : Cyberounds CME [Internet]).....	51
Figure 22 : Représentation schématique de la carte odotopique dans la perception des odeurs (Meierhenrich et al., 2005)	53
Figure 23 : Diminution des performances olfactives avec l'âge chez l'Homme (Bonfils, 2016)	62
Figure 24 : Les différents modes de respiration chez le chien (D'après Goldberg-Marcia et al., 1981).....	64
Figure 25 : Représentation schématique de l'oreille d'un chien (Crédit Image : billeco.com [Internet])	69
Figure 26 : Représentation schématique de l'oreille moyenne (Crédit Image : learn-electroacoustics.eu [Internet]).....	70
Figure 27 : Représentation schématique de l'oreille interne (Tobias et Paterson, 2012).....	70
Figure 28 : Représentation schématique de cochlée en coupe transversale (Crédit Image : cochlea.eu [Internet]).....	71
Figure 29 : Représentation schématique d'une section de cochlée en coupe transversale (Crédit Image : vetopsy.fr [Internet]).....	72
Figure 30 : Coupe transversale d'un organe de Corti de cobaye (Anderson et al. 1968)	73
Figure 31 : Représentation schématique de l'organisation de l'appareil de Corti (Klein, 2013)	73
Figure 32 : Représentation schématique de la strie vasculaire (Branis et Burda, 1985).....	74
Figure 33 : Coupe transversale d'une cochlée de Dalmatien sourd (Niparko et Finger, 1997)	75
Figure 34 : Représentation schématique des lésions cochléaires lors de la dysplasie cochléo-sacculaire du Dalmatien (D'après Anderson et al., 1968 ; Gaudron, 2015).....	76

Figure 35 : Représentation schématique de la propagation de l'onde sonore (cochlée déroulée) (Tortora et Derrickson, 2007)	78
Figure 36 : Représentation schématique des variations de conformation de la lame basale et fréquence de vibration associées (chez l'Homme) (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])	78
Figure 37 : Représentation schématique du potentiel endocochléaire (Crédit Image : cochlea.eu [Internet]).....	79
Figure 38 : Représentation schématique de la transduction du signal sonore au niveau d'une cellule ciliée (Gaudron, 2015)	80
Figure 39 : Représentation schématique de l'innervation des cellules ciliées internes (Crédit Image : cochlea.eu [Internet]).....	81
Figure 40 : Représentation schématique de l'innervation des cellules ciliées externes (Crédit Image : cochlea.eu [Internet]).....	81
Figure 41 : Représentation schématique des voies centripètes de l'information sonore (chez l'Homme) (Crédit Image : cochlea.eu [Internet]).....	82
Figure 42 : Représentation schématique du recyclage du potassium par la strie vasculaire (Niparko et Finger, 1997)	83
Figure 43 : Représentation schématique des différents transporteurs ioniques de la strie vasculaires impliqués dans le maintien du potentiel endocochléaire (Takeuchi et al., 2000)	84
Figure 44 : Chiot Dalmatien durant un dépistage PEA (Gaudron, 2015)	87
Figure 45 : Tracé PEA isoélectrique (Gaudron, 2015)	90
Figure 46 : Lien entre le trajet nerveux auditif et le tracé PEA (Tortora et Derrickson, 2007)	90
Figure 47 : Exemple de jouets utilisés pour la fanatisation (D'après Jacquet, 2003)	92
Figure 48 : Extrémité démontable du jouet (Jacquet, 2003)	93
Figure 49 : Planche à renforcement (Jacquet, 2003)	95
Figure 50 : Résumé de la phase de déboufrage d'un chien de gendarmerie dans l'apprentissage de la recherche de stupéfiants (Crédit Image : CHALARD Clément)	96
Figure 51 : Résumé de la phase de formation d'un chien de gendarmerie dans l'apprentissage de la recherche de stupéfiants (Crédit Image : CHALARD Clément)	97

Figure 52 : Représentation schématique des 3 tests olfactifs utilisés (Touj, 2021)	100
Figure 53 : Boudins de jeux utilisés lors de l'étude (Crédit Image : CHALARD Clément).....	106
Figure 54 : Structure chimique de l'isoamylacétate (Crédit Image CHALARD Clément)	107
Figure 55 : Structure chimique de l'éthylmaltol (Crédit Image : CHALARD Clément)	108
Figure 56 : Evolution du parfum de lavande en fonction du temps (ARKEMA Innovative Industry)	108
Figure 57 : Bocal utilisé pour imprégner les boudins de jeux avec l'odeur cible (Crédit Image : CHALARD Clément).....	109
Figure 58 : Résumé du protocole utilisé pour imprégner le boudin de jeu avec l'odeur cible (Crédit Image : CHALARD Clément).....	110
Figure 59 : Ligne de test utilisée par l'équipe NOSAÏS (Grandjean et al., 2022)	114

Table des tableaux

Tableau I : Comparaison des caractéristiques anatomiques et histologique du système olfactif entre l'Homme et le chien	38
Tableau II : Caractéristiques olfactives de différentes espèces (D'après Vadurel et Gogny, 1997) / : Non précisé	56
Tableau III : Nombre de gènes et pseudogènes olfactifs chez différentes espèces (D'après Quignon et al., 2005 ; Galibert et al. 2016).....	57
Tableau IV : Caractéristiques olfactives de différentes races de chien (D'après Vadurel et Gogny, 1997) / : Non précisé.....	58
Tableau V : Attributs comportementaux associés à quelques races de chiens (D'après Jamieson et al., 2017).....	59
Tableau VI : Exemples de substances délétères pour la fonction olfactive (D'après Coste, 2015).....	65
Tableau VII : Médicaments et conséquences sur la fonction olfactive chez l'Homme (D'après Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019)	66
Tableau VIII : La cohorte de chien utilisés pour l'étude	106
Tableau IX : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation des chiens au fil des séances. (Ici Papi)	111
Tableau X : Niveau de difficulté des différentes caches utilisées	113
Tableau XI : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Simba	115
Tableau XII : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Pastèque	116
Tableau XIII : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Looping	116
Tableau XIV : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Roi.....	117
Tableau XV : Bilan des acquisitions de chaque chien à la suite du protocole.....	117

Liste des abréviations

AMPC : Adénosine 3', 5'-monophosphate cyclique

ATP : Adénosine tri phosphate

Ca₂₊ : Ion calcium

GC : Chromatographie en phase gazeuse

IP3 : Inosine 1,4,5- triphosphate

IRM : Imagerie par résonance magnétique

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

K₊ : Ion potassium

Na₊ : Ion sodium

NRO : Neurones récepteurs olfactifs

OBP : Odorant binding protein

PEAp : Potentiels évoqués auditifs précoces

PIP2 : Phosphatidylinositol-4,5-bisphosphate

PLC : Phospholipase C

RCPG : Récepteur couplé aux protéines G

SPME : Spectrométrie de masse

Introduction

La surdité neurosensorielle la plus fréquente chez le chien est la surdité congénitale héréditaire. Elle se retrouve chez plus de 80 races de chiens à robe Merle ou Blanche. La prévalence chez le dalmatien varie de 16 à 30 %.

Ce trouble de l'audition est lié à la disparition précoce des cellules ciliées cochléaires, conséquence de la dégénérescence d'une strie vasculaire dépourvue de mélanocytes fonctionnels. C'est donc l'importance des mélanocytes dans la fonction cochléaire qui pourrait expliquer le lien entre surdité et absence de pigmentation chez certaines races (Dalmatiens, Dogues argentins ...).

Les sourds bilatéraux sont souvent des chiots très attentifs à leur environnement. Cependant les difficultés supposées pour les éduquer ou la gestion difficile du handicap rend l'adoption compliquée pour un propriétaire lambda. Ainsi, les contraintes liées à la surdité peuvent conduire éleveurs et/ou propriétaires à une demande d'euthanasie.

Le projet que nous proposons vise à dissuader du recours à l'euthanasie en mettant en évidence d'éventuelles compensations sensorielles à ce handicap pouvant alors être perçues comme des qualités spécifiques aux chiens sourds.

En effet, il a été montré qu'un déficit sensoriel congénital peut être compensé, grâce au phénomène de plasticité cérébrale, par le développement d'une perception accrue d'autres types de stimuli présents dans l'environnement, par exemple une perception accrue des stimuli sonores chez les personnes aveugles. En particulier, dans notre cas, on peut se demander si le déficit auditif chez le chien pourrait induire une plus grande sensibilité aux odeurs.

L'étude consiste à mettre au point une méthode expérimentale permettant d'évaluer le seuil de détection olfactive de chiens en comparant individus sourds et bi-entendants. Au cours de cette étude, deux groupes d'animaux seront alors testés à la discipline de la recherche en salle d'odeur simple avec des concentrations décroissantes. Dans un second temps, les animaux seront testés dans une procédure d'appariement différé ou de « line-up » au cours de laquelle ils devront montrer une réponse comportementale conditionnée à la présence de l'odeur cible dans l'un des bocaliers présents sur la ligne de test. Cette procédure nous permettra de contrôler les concentrations d'odeurs afin de mesurer de manière précise le seuil de détection des animaux sourds, que nous comparerons à celui des animaux contrôles.

Première partie : Étude bibliographique

I. Historique

A. Domestication du chien

Le chien (*Canis familiaris*) est l'animal le plus anciennement domestiqué par l'Homme. C'est un mammifère de la famille des canidés et plus précisément du groupe *Canis* qui se compose de huit espèces. Parmi ces huit espèces on retrouve le loup (*Canis lupus*) mais également le coyote (*Canis latrans*) ou encore le chacal (*Canis aureus*). Toutes les espèces du groupe sont interfécondes du fait de leur nombre de chromosomes identique (38 paires plus une paire de chromosomes sexuels). Jadis, on pensait que le chien avait pour origine plusieurs espèces de canidés sauvages à cause de la grande diversité (morphologique) des races actuelles. Cependant, c'est maintenant la thèse monophylétique qui est soutenue et le chien aurait alors un seul et unique ancêtre commun : le loup (Quignon, 2003 ; Dehassé, 2009 ; Frowen, 1999 ; Porteau, 2018).

C'est depuis la fin du Paléolithique (entre -40 000 et -12 500 ans) que le chien et l'Homme ont commencé à vivre ensemble. En effet, des peintures rupestres d'hommes et de chiens chassant ensemble ont été découvertes, ainsi que des ossements de chien proches de sépultures humaines qui dateraient de -12 000 ans (Frowen, 1999 ; Porteau, 2018). On a même trouvé des restes de loup associés à des restes humains vieux de 400 000 ans (Clutton-Brock, 1995) ce qui témoigne de l'utilisation bien plus ancienne du loup qui a abouti, in fine, à l'espèce chien. Et donc d'une domestication qui a commencé longtemps en amont (Figure 1).

Les analyses génétiques comparatives qui ont été faites entre le génome du loup et celui du chien montrent un très fort degré de parenté. Cependant, le chien et le loup sont finalement bien différents. Que ce soit morphologiquement ou dans leur comportement vis-à-vis de l'Homme il est aisé de faire la différence entre un Carlin et un loup gris.

Alors comment la domestication a-t-elle pu conduire à deux espèces si proches et différentes à la fois ? L'hypothèse principale est que quelques loups se seraient rapprochés des campements humains quand l'Homme est devenu sédentaire afin de profiter des restes alimentaires. Les loups auraient profité alors de la nourriture fournie par le campement, sans pour autant être une menace pour l'Homme, on parle de commensalisme. Ces loups furent alors peu à peu intégrés dans la vie du camp. Ils servaient notamment de nourriture mais surtout étaient des compagnons de chasse très efficaces (bien plus que l'Homme lui-même). C'est ainsi que la coopération entre l'Homme et le loup aurait débuté amenant avec elle des mutations génétiques. Le commensalisme devient alors une symbiose, c'est-à-dire que la relation est profitable à la fois pour le loup et pour l'Homme. Le loup « domestiqué » devient notamment plus petit, tout comme ses dents et son cerveau. Au fil des descendance il devient progressivement un chien et s'éloigne des loups sauvages.

Aussi, il est très probable que l'homme au cours de cette interaction, aurait adopté des louveteaux orphelins puis les aurait ensuite élevés à sa main, directement au sein du camp (Quignon, 2003 ; Dehasse, 2009 ; Porteau, 2018).



Figure 1 : Du loup aux chiens (Porteau, 2018)

Finalement, d'après les études génomiques et archéologiques, la domestication du chien remonterait à environ -14 000 ans et aurait eu au minimum deux foyers géographiques distincts (Frantz et al., 2016).

B. Utilisation du chien

1) Utilisations ancestrales

Au début de la domestication, l'Homme s'est aperçu que certains des « loups domestiqués » étaient meilleurs à la chasse que d'autres ou encore que certains étaient plus grands. C'est ainsi que plusieurs profils se sont détachés les uns des autres. S'ensuivent des millénaires de sélection toujours plus fine par (et pour) l'Homme avec comme résultat nos chiens domestiques actuels, de morphologies, comportements et utilités distincts (Frowen, 1999 ; Dehasse, 2009).

Le loup a donc subi une pression de sélection qui a conduit, in fine, à l'espèce chien. C'est-à-dire que ce sont les mutations conférant un avantage pour les diverses utilisations par l'Homme qui ont été sélectionnées, conservées et transmises de génération en génération.

Si on se concentre sur les premières utilisations du chien, l'Homme aurait d'abord accepté la cohabitation pour trois raisons : la nourriture et la chasse (comme évoqué précédemment) mais aussi la protection de ses ressources. En effet le chien pouvait être sacrifié et nourrir le camp lors des périodes où les ressources extérieures étaient faibles. Il était également un excellent compagnon de chasse et les plus grands individus servaient à protéger le camp de toute menace pouvant provenir de l'extérieur.

Il semblerait aussi que le chien ait joué un rôle social dès le début de sa domestication notamment par des interactions nombreuses avec les femmes et les enfants. En effet, des louveteaux étaient adoptés par les campements pour assouvir l'instinct maternel des femmes, tenir compagnie, on encore pour des motivations ludiques (Giffroy, 2007).

Finalement, c'est pour la chasse que le nez du chien a d'abord été utilisé par l'Homme et cela afin de pister et retrouver une proie blessée (ou non d'ailleurs). On peut aussi citer les chiens truffiers comme utilisation empirique du nez du chien, la truffe ayant même donnée son nom au nez du chien à cause de leur ressemblance visuelle.

2) Utilisations actuelles dans la quête d'odeurs

Même si on utilise encore le flair du chien pour la chasse ou la recherche de truffe comme par le passé, les performances olfactives hors normes du chien sont maintenant utilisées dans de nombreux domaines.

Le plus connu, sans doute, est celui de la sécurité avec notamment les chiens de détection de drogues ou d'explosifs qu'utilisent les douaniers ou encore les forces de l'ordre dans les aéroports par exemple. Les chiens seraient d'ailleurs le moyen le plus performant de détection des mines anti personnelles en zone de combat (Furton et Myers, 2001). Les forces de l'ordre se servent également des facultés de pistage du chien pour la recherche (et la poursuite) de suspects et ces chiens seraient capables de tracer un individu jusqu'à 48 heures après son passage (Harvey et Harvey, 2003).

Les sapeurs-pompiers utilisent également des chiens pour la recherche de victimes sous les décombres, dans les avalanches et même pour la recherche de personnes noyées. Il existe également des chiens qui peuvent identifier s'il y a eu ou non utilisation de produits inflammables sur le site d'un incendie. Ainsi on peut déterminer la nature criminelle ou non de ce dernier (Kurz et al., 1994).

Dans le domaine de la santé c'est depuis les années 2000 qu'on s'intéresse aux chiens potentiellement « détecteurs de cancer » et cette capacité est maintenant démontrée pour plusieurs types de cancer, le plus connu étant celui du sein, mais également pour le colon, la vessie, des poumons ou encore l'utérus (Sonada et al., 2011).

On peut aussi évoquer les chiens d'assistance qui préviennent leur maître souffrant d'épilepsie qu'ils vont faire une crise dans un futur proche (dans les 45 min qui suivent le signalement du chien). Ainsi, le propriétaire peut anticiper sa crise. Il n'a pas encore été démontré que ces chiens répondent à des signaux olfactifs pour prévenir leurs maîtres mais c'est une possibilité (Edney, 1993 ; Strong et al., 1999 ; Brown & Strong, 2001).

Plus récemment, de nombreuses équipes dans le monde ont essayé d'utiliser les chiens dans la détection olfactive de la COVID 19. C'était en effet une option pour avoir un test non invasif et peu coûteux. Une équipe d'Alfort a établi un protocole débouchant sur une sensibilité moyenne allant de 95 à 97 % et une spécificité moyenne allant de 32 à 94 % (Grandjean et al., 2022). Cependant, dans ce protocole, les chiens identifient l'odeur d'individus infectés parmi des individus non infectés. On ne peut alors pas conclure sur leur capacité à identifier spécifiquement des individus infectés par la COVID 19, mais uniquement sur leur capacité à détecter la présence d'une infection virale quelconque.

Dans le domaine de l'environnement, moins connu, on utilise par exemple les chiens dans la détection de nuisibles comme les termites et cela avant qu'ils ne causent des dégâts, c'est à dire quand ils sont encore invisibles (Brooks et al., 2003), mais également par exemple pour la détection des cochenilles de la vigne.

Enfin, une utilisation très approfondie de l'odorat du chien réside en l'identification judiciaire, que l'on nomme odorologie et qui est pratiqué en France par la Police Technique et Scientifique. Il est demandé au chien d'être capable de faire l'association entre des odeurs retrouvées sur une scène de crime et l'odeur des suspects. Il ne s'agit plus de sentir une odeur et de la rechercher mais plutôt d'une vraie identification où le chien doit indiquer s'il y a la même signature olfactive dans les deux odeurs qu'on lui présente et qui lui sont totalement inconnues. Cette technique s'est développée en Hongrie et est aujourd'hui considérée comme une preuve à charge, qui peut être considérée ou non par les magistrats (Settle et al., 1994).

Du fait de toutes ces utilisations, le nez du chien s'avère être l'outil le plus efficace et le plus fiable dont dispose indirectement l'Homme à ce jour. Browne et al. (2006) disent même « L'unique facteur pouvant limiter l'entraînement du chien à la détection d'odeurs pourrait bien être notre propre imagination ». Mais qu'a-t-il de si particulier ?

II. Le système olfactif du chien

A. Anatomie-histologie

1) Le nez

Le nez du chien, ou truffe, est généralement noir ou marron, quelquefois dépigmenté, humide et glabre. Il est coupé au milieu par un sillon naso-labial : le philtrum. De part et d'autre du philtrum on trouve deux orifices, les narines, qui représentent l'entrée d'air et, par extension, de molécules odorantes (Figure 2).

Les narines ne sont pas ovales comme celles de l'Homme mais plutôt en forme de virgule avec un bord dorsal épais et mobile : l'aile du nez. La queue latérale se prolonge par un faible sillon alaire (Barone, 1997 ; Kroely, 2011 ; Collin, 2003).

La surface du tégument de la truffe est sans poils, on peut y observer de multiples aires polygonales dont la disposition est propre à chaque individu (Evans & De Lahunra, 2012 ; Zographos, 2017 ; Goux, 2019).

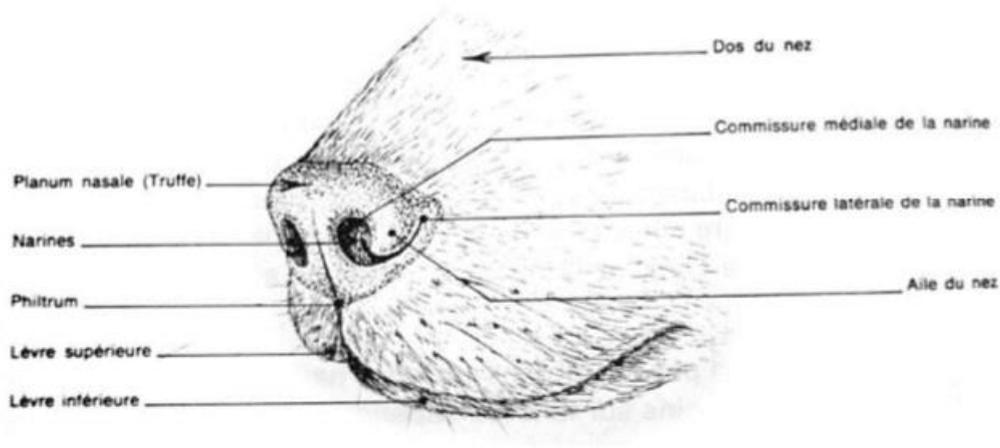


Figure 2 : Représentation schématique de la truffe d'un chien (Barone, 1997)

C'est l'os nasal qui forme le toit du nez, tandis que l'os maxillaire et l'os incisif forment les murs et le plancher. C'est la charpente cartilagineuse qui permet aux narines de rester ouvertes. Le cartilage alaire est le plus développé et porte l'aile du nez. Le septum nasal sépare les deux cavités nasales, il est d'abord cartilagineux, puis fibreux dans sa partie caudale où il forme donc un os. D'autres cartilages complètent la structure tels que le cartilage latéral ventral et le cartilage accessoire latéral (Combre, 2006 ; Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Barone, 1997) (Figure 3).

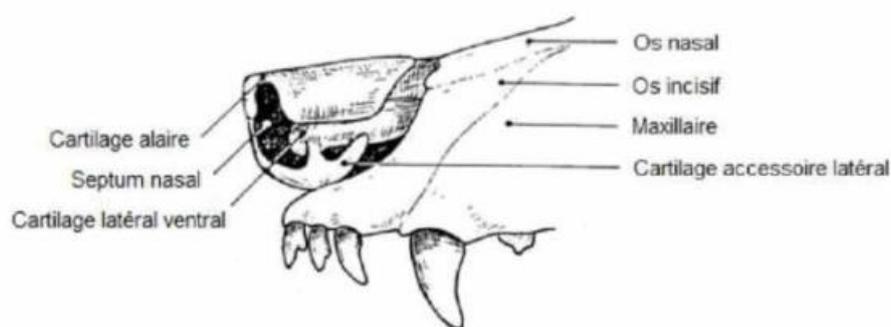


Figure 3 : Schéma de la charpente cartilagineuse des narines d'un chien (Barone, 1984)

Ce sont des muscles qui jouent sur le cartilage afin d'adapter le calibre des narines et ainsi de moduler le passage de l'air. Le principal est le muscle dilatateur des narines mais on peut également citer le muscle releveur naso-labial et le muscle releveur de la lèvre supérieure (Combre, 2006 ; Coste, 2015 ; Porteau, 2018 ; Barone, 1997).

2) Les cavités nasales

Le chien possède donc deux cavités nasales, une à gauche et une à droite. Ces cavités sont creusées dans les os de la tête et vont du vestibule nasal à l'entrée des narines, jusqu'à la lame criblée de l'ethmoïde qui fait la frontière avec la cavité crânienne. Elles se situent juste au-dessus de la cavité buccale dont elles sont séparées par le palais. Il y a une communication entre l'extrémité caudale des cavités nasales et le nasopharynx : le méat naso-pharyngien.

La longueur des cavités varie selon les races de chien mais d'une manière générale, les cavités nasales du chien sont très développées si on les compare à celles d'autres mammifères. Dans chacune d'elles on trouve des lames osseuses qui s'enroulent sur elles-mêmes formant ainsi les cornets nasaux qui eux-mêmes délimitent de petites zones appelées méats (Evans, 2012 ; Barone, 1997 ; Zographos, 2017 ; Goux, 2019) (Figure 4).

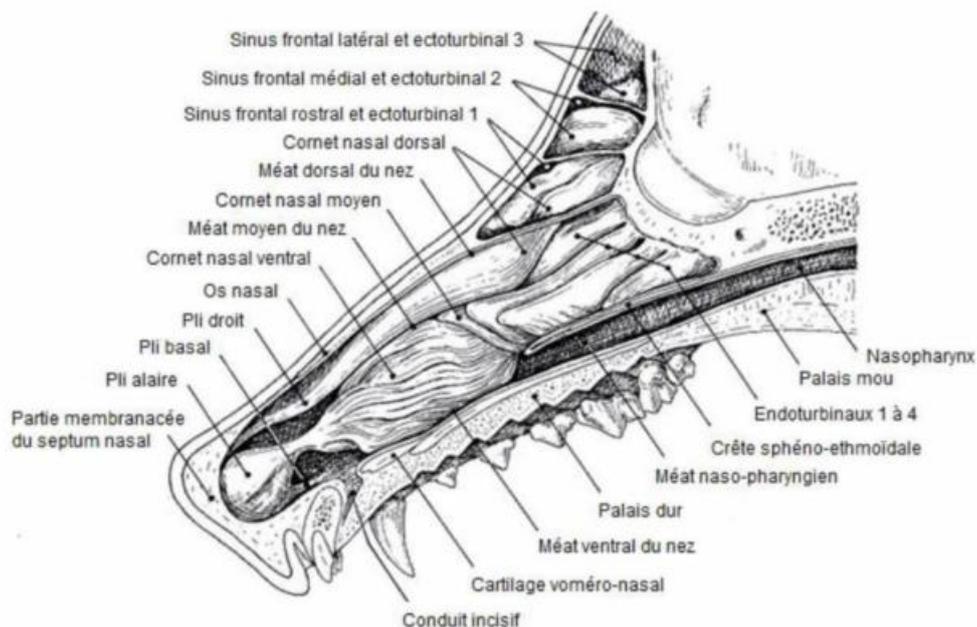


Figure 4 : Cavité nasale du chien en coupe sagittale (Barone, 1997)

Il y a trois cornets nasaux : le cornet nasal dorsal, le cornet nasal ventral et le cornet nasal moyen (Figure 4). Les lames osseuses qui les composent sont tapissées par de la muqueuse nasale.

Le cornet nasal dorsal est le plus réduit, il est fin et long et sa lamelle n'est pas enroulée (Figure 5). Plus court et plus gros, le cornet nasal ventral occupe les deux tiers antérieurs des cavités nasales. Les lamelles sont enroulées ventralement avec au début une lame osseuse principale qui se poursuit en lamelles secondaires puis tertiaires (Figure 5). Le cornet nasal moyen correspond à la grande volute de l'éthmoïde et occupe quasiment la moitié de l'espace. Cette volute n'est rien d'autre que la lame osseuse principale de l'éthmoïde.

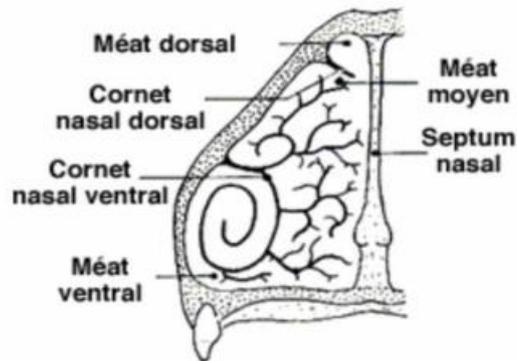


Figure 5 : Coupe transversale des cornets et méats nasaux d'un chien (Chatelain, 2005)

De plus, il y a trois méats (dorsal, ventral et moyen) qui correspondent aux espaces entre les cornets nasaux et le septum nasal (Figure 5). Les trois méats se rejoignent et forment un méat nasal commun.

Enfin, la partie dorso-caudale des cavités nasales correspond au labyrinthe éthmoïdal. C'est une structure clé de l'olfaction composée d'une multitude de feuillets osseux enroulés sur eux-mêmes et recouverts par de la muqueuse olfactive. On parle de volutes éthmoïdales avec, latéralement, les ectoturbinas et, médialement, les endoturbinas (Barone, 1997 ; Collin, 2003 ; Combre, 2006 ; Kroely, 2011 ; Porteau, 2018) (Figure 6).



Figure 6 : Labyrinthe éthmoïdal d'un chien en coupe transversale (Kroely, 2011)

C'est donc cette architecture particulièrement développée qui permet d'augmenter au maximum la surface entre la muqueuse olfactive et les molécules odorantes et ainsi d'obtenir des capacités olfactives hors normes.

3) Les sinus para nasaux

Les sinus para nasaux sont des cavités creusées dans les os du crâne, remplies d'air et qui communiquent non seulement entre elles mais également avec les cavités nasales. Il y en a deux chez le chien : le sinus frontal et le sinus maxillaire. Le premier est séparé en trois parties (sinus frontal rostral, médial et latéral) (Figure 7). La taille des cavités varie en fonction des races, notamment selon le type morphologique (brachycéphale, dolichocéphale et mésocéphale).

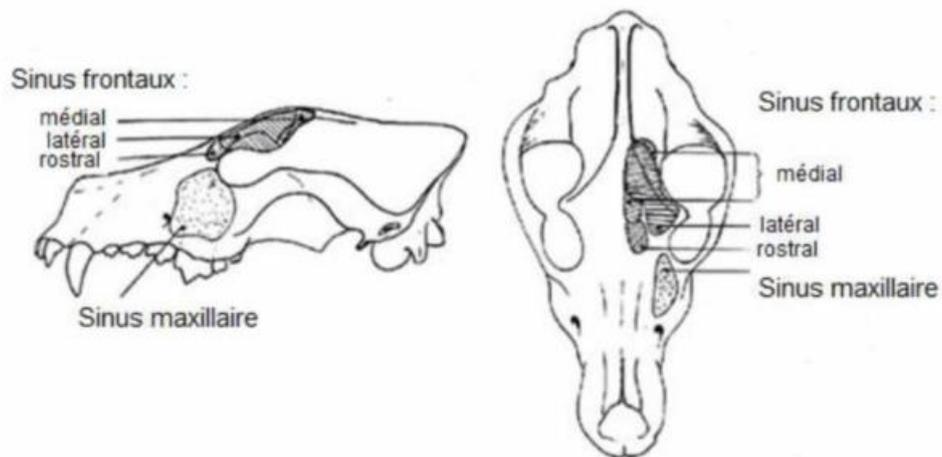


Figure 7 : Représentation schématique des sinus chez le chien (Chatelain, 2005)

La présence de muqueuse olfactive dans chacun de ces sinus leur confère également une fonctionnalité dans le traitement des odeurs, notamment dans le sinus frontal. (Barone, 1997 ; Coste, 2015 ; Goux, 2019).

4) La muqueuse olfactive

Elle tapisse l'intégralité des cavités nasales et peut représenter une surface égale à deux cents centimètres carrés, alors que la surface représente seulement deux à trois centimètres carrés chez l'Homme (Tableau I).

Il existe deux types de muqueuses. La muqueuse respiratoire, rosée à rouge, qui tapisse la partie crâniale des cavités nasales et la muqueuse olfactive qui contient des caroténoïdes et

qui apparaît alors plutôt brune/jaunâtre (Figure 8). Elle recouvre le labyrinthe ethmoïdal ainsi qu'une partie des sinus para nasaux (Barone, 1997).

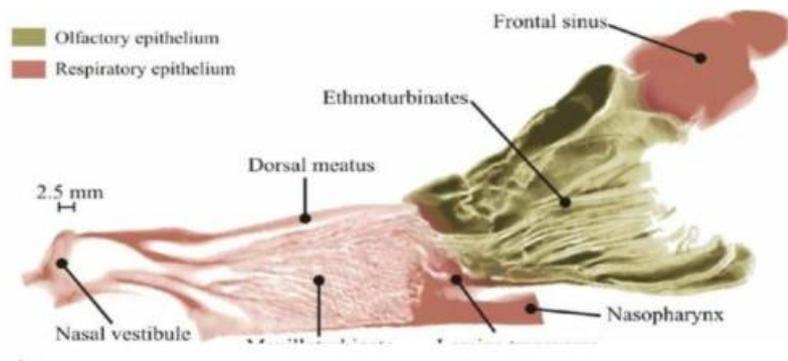
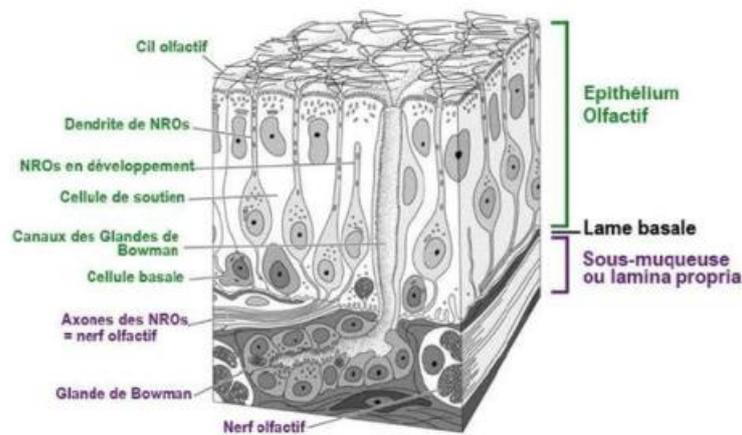


Figure 8 : Coupe sagittale de la cavité nasale droite d'un chien
(D'après Craven et al., 2010)

D'un point de vue histologique, l'épithélium olfactif est un neuroépithélium cylindrique et pseudo stratifié (Figure 9). On y trouve les trois types de cellules suivantes : (Barone, 1997)

- Les cellules basales forment une seule et unique couche, qui repose sur la lame basale. On y trouve des cellules horizontales et des cellules globulaires, plus volumineuses et superficielles. Ce sont les précurseurs des neurones olfactifs, ce sont donc elles qui permettent la neurogénèse, c'est-à-dire la création de nouveaux neurones olfactifs (Porteau, 2018).
- Les cellules de soutien reposent également sur la lame basale. Elles sont en forme de prisme et occupent toute la hauteur de l'épithélium. Elles présentent des villosités au niveau apical, du côté de la lumière des cavités nasales. Leur rôle va être de réguler l'environnement des neurones olfactifs (Coste, 2015 ; Kroely, 2011 ; Goux 2019).
- Les cellules olfactives (ou neuroépithéliocytes) sont les cellules sensorielles de la muqueuse. Leur durée de vie est de 100 jours, on observe donc un renouvellement permanent. Elles sont largement majoritaires (70 % de la muqueuse). On en compte entre 100 millions pour les chiens à nez court, et 300 millions pour les chiens à nez long. En comparaison, on en compte seulement 5 millions chez l'Homme avec une densité de cellules olfactives au niveau de l'épithélium 100 fois moindre (Rosell, 2016). Ces cellules sont des neurones bipolaires avec un dendrite unique qui se termine par un petit renflement couvert de cil au niveau de la lumière de la cavité. C'est au niveau des cils, dans le mucus, que s'effectue le contact avec les molécules odorantes. On compte 100 à 150 cils par neurone olfactif chez le chien, ces derniers formant alors un véritable piège à odeur (contre six à huit chez l'Homme). Le corps de la cellule se situe entre les cellules de soutien qui lui assurent un environnement favorable. Les axones partent en direction opposée et traversent les cellules basales puis la lame criblée de

l'ethmoïde pour rejoindre la substance grise du bulbe olfactif en formant les nerfs olfactifs (Vadurel et Gogny, 1997 ; Combre, 2006 ; Coste, 2015).



NROs : Neurones Récepteurs Olfactifs

Figure 9 : Schématisation d'une coupe en trois dimensions de la muqueuse olfactive (Buron, 2009)

Une épaisse couche de mucus recouvre la muqueuse olfactive. Ce mucus joue un rôle de protection mais également dans le transport des molécules odorantes. Il est produit par les glandes de Bowman qui se situent dans la sous-muqueuse ou lamina propria (Figure 9) (Barone 1997 ; Kroely 2011 ; Goux 2019).

Tableau I : Comparaison des caractéristiques anatomiques et histologique du système olfactif entre l'Homme et le chien

	Surface de muqueuse olfactive (en cm ²)	Nombre de cellules olfactives (Millions)	Nombre de cils par neurone olfactif
Homme	2-3	5	5-8
Chien	200	100-300	100-150

5) Le bulbe olfactif (4)

Le bulbe olfactif correspond à la structure cérébrale primaire du traitement de l'information olfactive. Il représente le premier relais de l'information en provenance des neurones olfactifs (dit de premier ordre). Il est relié à d'autres structures cérébrales qui forment quant à elles le cortex olfactif ou centre olfactif secondaire, lui-même décrit dans la partie suivante (Holley et al., 2013 ; Porteau, 2018).

Le bulbe olfactif reçoit donc les projections des cellules neurosensorielles de la muqueuse olfactive. D'un point de vue histologique, il s'organise en sept couches concentriques (Figure 10). De la plus superficielle à la plus profonde on retrouve : (Kroely 2011 ; Coste, 2015 ; Zographos 2017 ; Goux, 2019)

- La couche des fibres olfactives qui correspond en fait aux axones des nombreux neurones olfactifs. Cette couche s'appuie sur la lame criblée de l'ethmoïde.
- La couche glomérulaire, lieu où se font les connexions synaptiques entre les axones des neurones olfactifs et les dendrites des cellules mitrales et à panache. On retrouve approximativement 2 000 glomérules, chacun d'eux étant le lieu de convergence de plusieurs milliers d'axones (environ 25 000) sur seulement une vingtaine de cellules mitrales. Pour compléter cette couche, on trouve des interneurons qui servent à la connexion des glomérules entre eux, et qu'on appelle les cellules périglomérulaires.
- La couche plexiforme externe est la couche où passent les dendrites des cellules mitrales. On y retrouve les cellules à panaches, qui sont des cellules plus petites et plus nombreuses que les cellules mitrales.
- La couche des cellules mitrales contient, comme son nom l'indique, les corps cellulaires des cellules mitrales. Ce sont de grosses cellules triangulaires mais peu nombreuses.
- La couche plexiforme interne est globalement très pauvre en cellules. On y retrouve les projections axonales des cellules mitrales et à panache et les dendrites des cellules de la couche des grains qui correspond à la couche suivante.
- La couche des grains se compose de nombreuses cellules dites granulaires ou granuliformes. C'est la couche la plus épaisse du bulbe et ses cellules sont en fait les interneurons des cellules mitrales et à panache. Elles permettent alors un contrôle par feedback entre ces cellules.

- La substance blanche, septième et dernière couche, représente la couche la plus profonde. Principalement composée des axones des cellules mitrales et à panache qui se projettent ensuite vers les centres olfactifs secondaires.

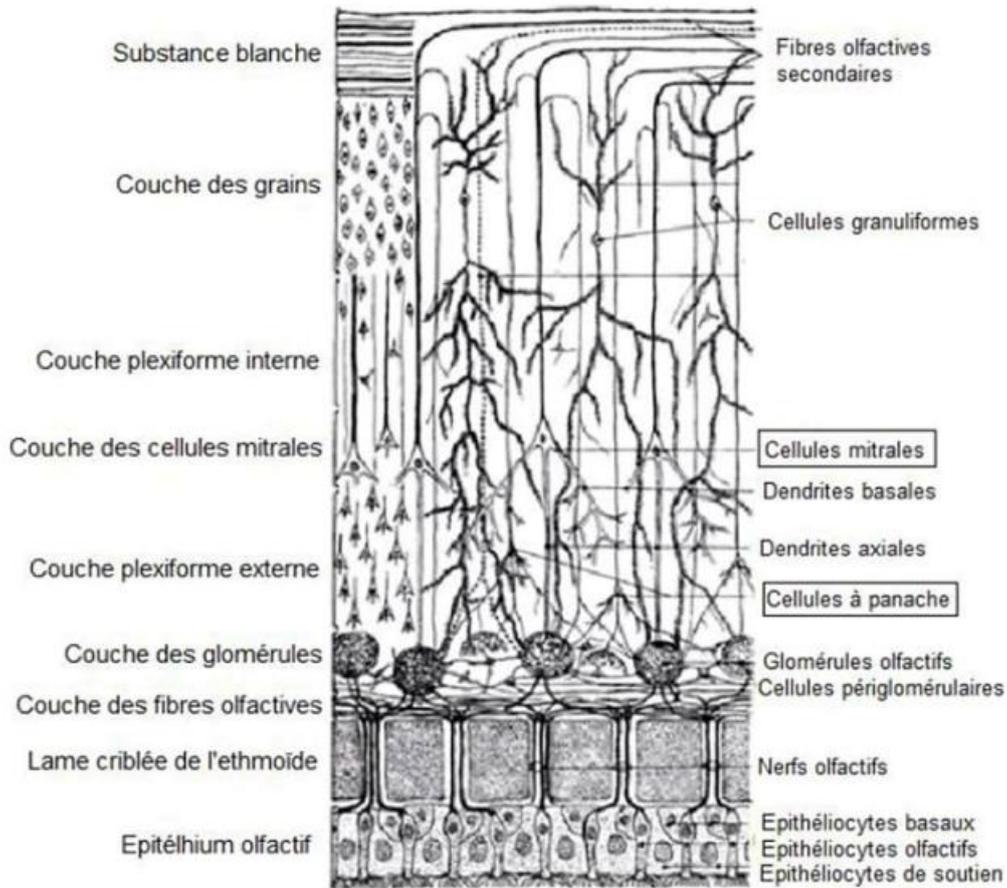


Figure 10 : Représentation schématique en coupe transversale des 7 couches du bulbe olfactif (Barone, 2004)

C'est donc au niveau du bulbe olfactif que convergent les informations olfactives reçues dans la lumière des cavités nasales. Par une interaction complexe entre les différents neurones qui le composent, l'information est alors potentialisée et modulée avant d'être transmise vers les centres secondaires.

6) Centres olfactifs secondaires et supérieurs

Les axones des cellules mitrales et des cellules à panache forment donc la substance blanche du bulbe olfactif puis le pédoncule olfactif. Ce gros faisceau représente les tractus olfactifs

latéral et médial pour qui transmettent l'information vers les centres secondaires et supérieurs (Combre, 2006 ; Kroely 2011 ; Coste, 2015 ; Porteau, 2018) (Figure 11).

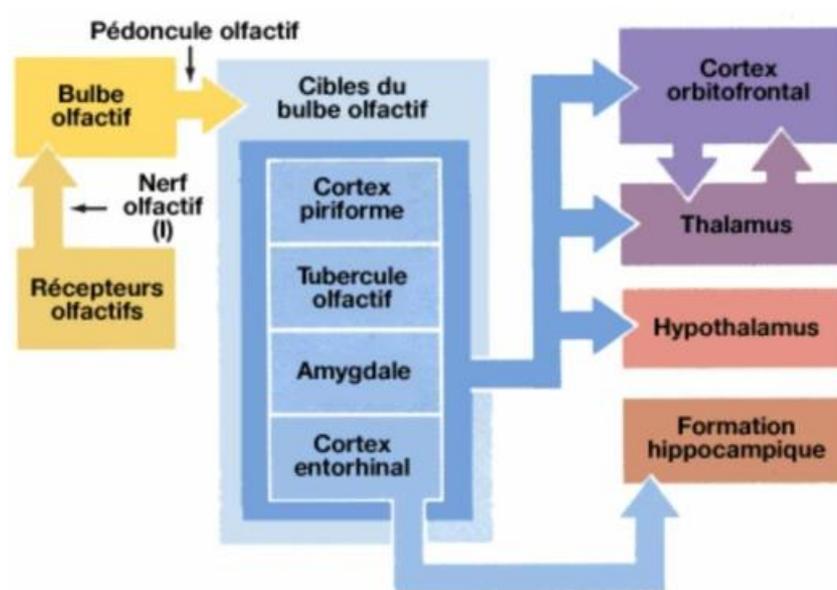


Figure 11 : Représentation des projections centripètes du bulbe olfactif
(Crédit image : vetopsy.fr)

Les centres olfactifs secondaires se situent dans le rhinencéphale. Ils sont représentés par le cortex olfactif, le lobe piriforme et les noyaux amygdaliens (Barone, 2004 ; Zographos, 2017 ; Goux, 2019).

Ces structures acheminent ensuite des informations vers les centres olfactifs supérieurs : dans le néocortex, le diencephale (après un relais thalamique ou hypothalamique) ainsi qu'au niveau du système limbique. Ce dernier regroupe l'amygdale, structure associée à nos émotions, et l'hippocampe, structure de la mémoire longue. Il est alors assez facile de comprendre qu'une odeur perçue peut être reliée à des souvenirs et nous faire ressentir une émotion (Combre, 2006 ; Holley et al., 2013 ; Porteau, 2018).

7) Système olfactif accessoire

Il est reconnu depuis longtemps maintenant que des substances nommées phéromones interviennent dans la communication inter-individuelle au sein d'une même espèce. Elles véhiculent de nombreuses informations sur le sexe de l'animal, le statut de reproduction, les comportements sexuels et sociaux et impactent le comportement et la physiologie du congénère. La communication par les phéromones est principalement assurée par un second système olfactif, dit « accessoire ». Le plus connu est l'organe voméro-nasal. Deux autres

systèmes en font également partie : l'organe septal de Masera et le ganglion de Grueneberg (Rodriguez, 2013 ; Porteau, 2018).

- L'organe voméro-nasal ou organe de Jacobson

Situé dans le plancher de la cavité nasale, au dessus du palais et de part et d'autre du septum nasal, c'est un organe pair, annexe du système olfactif et dont le rôle reste mal connu de nos jours. Chez un chien de taille moyenne il mesure environ quatre centimètres de long avec une forme caractéristique en croissant sur une coupe transversale. Sa face médiale est tapissée d'un épithélium de type olfactif avec des neurones voméro-nasaux qui expriment trois types de récepteurs particuliers et dont les projections axonales constituent le nerf voméro-nasal qui achemine l'information vers le bulbe olfactif accessoire (Figure 12).

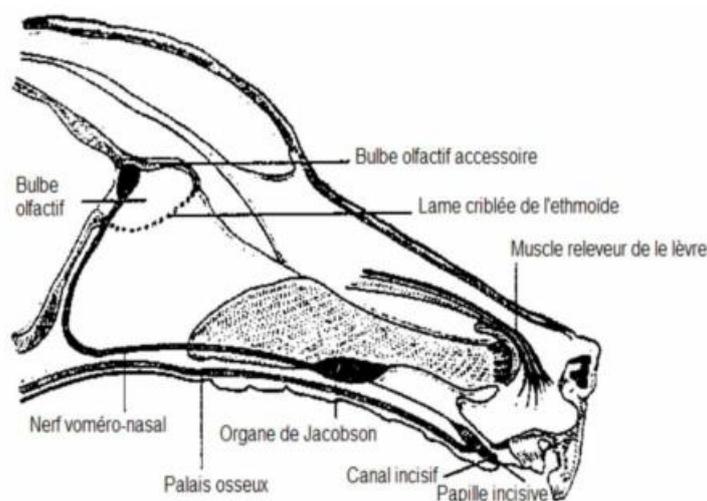


Figure 12 : Schématisation en coupe sagittale de l'organe voméro-nasal (Pageat, 1997)

Cet organe fut longtemps perçu comme un système permettant exclusivement la perception des phéromones et les comportements stéréotypés qui en découlent. Cependant, il aurait des rôles plus divers notamment dans les comportements sexuels mais aussi dans l'interaction proie/prédateur ou encore dans les relations de protection entre une femelle et sa progéniture (Rodriguez, 2013 ; Porteau, 2018).

- L'organe septal de Masera

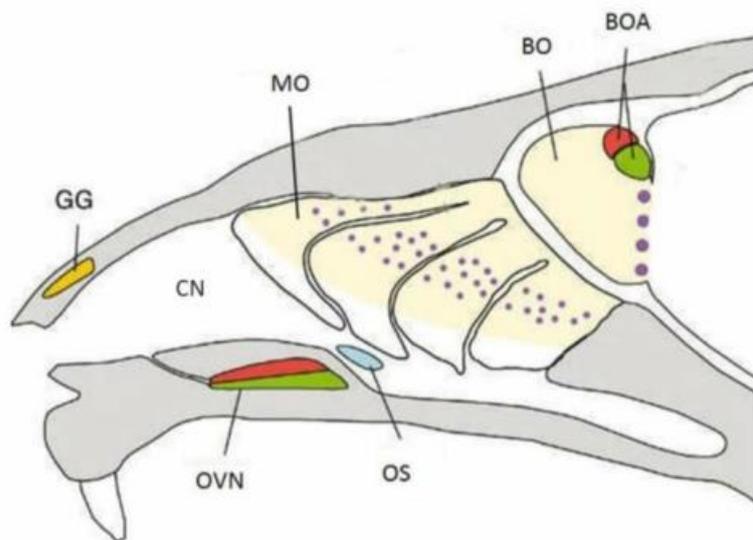
C'est un épithélium olfactif supplémentaire que l'on retrouve à la base de la cloison nasale, de part et d'autre de celle-ci, et qui est distinct de l'épithélium olfactif principal. D'un point de vue histologique, il est relativement semblable à l'épithélium olfactif principal et ses neurones

se projettent également dans le bulbe olfactif principal, mais au niveau de glomérules spécifiques appelés glomérules septaux.

Présent chez de nombreux mammifères, l'organe septal aurait une sensibilité accrue aux molécules odorantes par rapport à l'épithélium principal. Une plus faible concentration en molécule suffirait pour transmettre une information nerveuse. Son rôle serait alors de prévenir le système olfactif principal de la présence d'odeurs pour que ce dernier « s'active » et les discrimine (Grosmaître, 2013 ; Porteau 2018).

- Le ganglion de Grueneberg

Représenté par un ensemble de cellules ovales, en grappes, situées dans la partie antérieure des cavités nasales (Figure 13), ce ganglion jouerait un rôle dans la perception olfactive mais les mécanismes restent peu connus de nos jours. Les cellules sont différentes des neurones olfactifs et projettent vers quelques glomérules de la partie dorsale du bulbe olfactif (Porteau, 2018 ; Goux, 2019).



GG : Ganglion de Grueneberg – CN : Cavité nasale – MO : Muqueuse olfactive – BO : Bulbe olfactif - BOA : Bulbe olfactif accessoire – OVN : Organe voméro-nasal – OS : Organe septal.

Figure 13 : Organisation générale du système olfactif accessoire chez le rongeur (D'après Brennan et Zufall, 2006)

B. Physiologie

Depuis longtemps, l'olfaction est un sens qui intrigue les chercheurs. En 1991, Linda Buck et Richard Axel mettent en évidence la famille de gènes qui codent pour les récepteurs olfactifs.

Leur découverte en entraîne de nombreuses autres sur le sujet et ils reçoivent pour ce travail le Prix Nobel de Physiologie et de Médecine en 2004 (Porteau, 2018).

L'olfaction est un sens dit chimique, c'est-à-dire que ce sont les propriétés chimiques du stimulus qui donnent naissance à la sensation. Il en est de même pour le goût et cela s'oppose à la vue par exemple qui, elle, est un sens dit physique. C'est-à-dire que la vue met en jeu les propriétés physiques du stimulus (Coste, 2015 ; Holley, 2006 ; Thomas-Danguin et al., 2013 ; Porteau, 2018).

Ce sont donc les molécules chimiques volatiles qui vont être à l'origine du stimulus olfactif qui sera ensuite codé en un message nerveux par les structures périphériques (épithélium), primaires (bulbe olfactif) et secondaires (cortex, amygdale, hippocampe ...).

1) La molécule odorante

Pour avoir une propriété odorante, une substance doit répondre à plusieurs critères. Elle doit avoir un poids moléculaire moyen (17-300 Daltons), être un minimum soluble dans l'eau, avoir une faible polarité et être lipophile.

La volatilité de la molécule est un critère très important car c'est celui qui lui permettra d'être transportée par le courant aérien vers la muqueuse olfactive. La solubilité dans l'eau et/ou la graisse permet, quant à elle, à la molécule de pouvoir pénétrer dans le mucus (où se situent les cils des neurones olfactifs) (Roqueplo, 2003 ; Thomas-Danguin et al. 2013 ; Porteau, 2018).

En effet on trouve un abondant mucus à la surface de la muqueuse olfactive. Comme dit précédemment, il est produit par des glandes spécifiques de la sous muqueuse : les glandes de Bowman. Par sa composition aqueuse, il assure un rôle de protection de la muqueuse contre la déshydratation ainsi que contre les poussières ou les microorganismes qui pourraient venir l'irriter. C'est également un milieu qui favorise les interactions entre les molécules odorantes et les récepteurs olfactifs car il est composé de protéines particulières appelées les Odorant Binding Proteins (OBP). Ce sont des protéines capables de transporter des molécules lipophiles, elles permettent alors le passage de molécules odorantes hydrophobes vers les récepteurs olfactifs. Ces protéines jouent également un rôle dans la distribution des molécules odorantes, elles retiennent les molécules dans le mucus et empêchent ainsi une éventuelle saturation des récepteurs (Quignon, 2003 ; Maïbèche et al., 2013 ; Porteau, 2018).

Une molécule n'a pas besoin d'avoir un groupement spécifique pour se fixer sur un récepteur, en revanche, un groupement spécifique peut donner une odeur spécifique à une molécule. D'ailleurs, deux molécules de structure chimique similaire peuvent représenter des odeurs proches, mais ce n'est pas une règle absolue (Figure 14). En effet, deux molécules de

structures proches peuvent également représenter des odeurs très différentes et deux molécules de structures très différentes représenter des odeurs proches.

Par le fait que les énantiomères représentent souvent des odeurs différentes, on sait que la structure tridimensionnelle des molécules joue un rôle très important dans la perception olfactive (Meierhenrich et al., 2005 ; Goux, 2019).

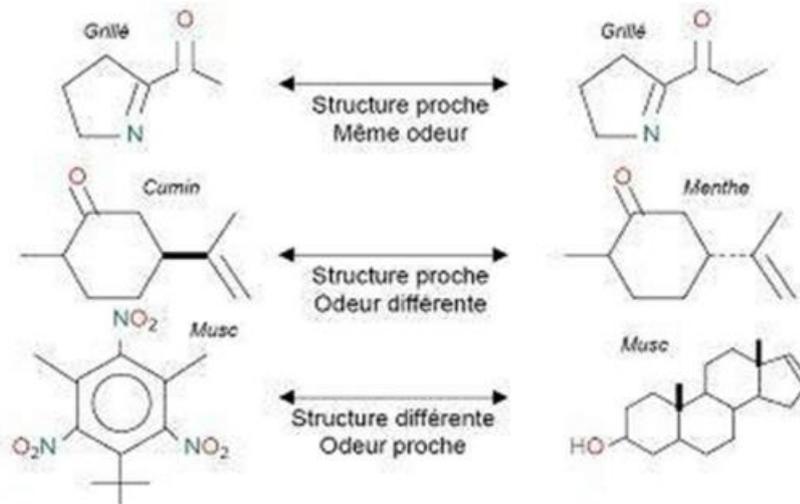


Figure 14 : Exemple de formules chimiques et leurs odeurs associées (Source image : Les propriétés des molécules odorantes – TPE La reconnaissance des odeurs [Internet])

2) Cheminement vers l'appareil olfactif et dissémination

C'est donc la volatilité des molécules odorantes qui va leur permettre d'être véhiculées par un courant aérien vers la muqueuse olfactive où elles seront perçues. Pour cela on distingue deux voies : la voie ortho-nasale, majoritaire, et la voie rétro-nasale (Combre, 2006 ; Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Porteau, 2018) (Figure 15).

- La voie orthonasale correspond au passage d'air inspiré dans les cavités nasales qui donnera directement naissance à la perception d'une odeur. C'est-à-dire que c'est la fraction de molécules qui ira au contact de la muqueuse olfactive lors du passage du courant aérien inspiratoire dans les cavités nasales. Effectivement, une petite partie des molécules (autour de 10 %) va atteindre la muqueuse sensorielle lors de l'inspiration classique, c'est-à-dire à but respiratoire. Le reste de l'air longe l'étage inférieur des cavités nasales et est conduit vers les poumons (Craven et al., 2010 ; Combre, 2006 ; Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Porteau ; 2018 ; Roqueplo, 2003 ; Goux, 2019 ; Thomas-Danguin et al., 2013).

Pour amplifier la quantité de molécules odorantes qui arrivent au niveau de la muqueuse olfactive, le chien renifle ou flaire. Ainsi, le débit et la vitesse de l'air augmente, on passe de 100 millilitres à un litre par seconde, et d'un mètre par seconde à dix mètres par seconde. L'augmentation de la vitesse entraîne en plus une déviation du courant aérien vers la partie supérieure des cavités nasales et donc une fraction d'air perçue supérieure (Vadurel et Gogny, 1997 ; Roqueplo, 2003 ; Porteau 2018 ; Goux, 2019). En fait, le chien est capable, soit d'orienter le flux d'air principalement vers les poumons (quand l'air est pauvre en molécules volatiles odorantes), soit d'orienter le flux d'air vers son épithélium olfactif (quand l'air est chargé en molécules volatiles odorantes).

- La voie rétro-nasale correspond à la fraction de molécules qui ira au contact de la muqueuse olfactive lors du passage du courant aérien expiratoire dans les cavités nasales. Ce sont en fait des substances odorantes contenues dans la cavité buccale et qui atteignent l'appareil olfactif lors de l'expiration. Cette voie participe grandement à la perception de la saveur (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Roqueplo, 2003 ; Holley, 2006 ; Thomas-Danguin, 2013 ; Porteau, 2018 ; Goux, 2019).



Figure 15 : Les différentes voies pour le courant aérien (Zographos, 2017)

En outre, le nez du chien dispose de narines très mobiles avec une sorte de clapet : le pli alaire. Ce « clapet » s'ouvre et se ferme pour orienter le flux d'air entrant ou sortant. Le flux d'air entrant passe médio-dorsalement tandis que le flux sortant passe latéro-ventralement (Figure 16). Ainsi, il n'y a pas de mélange entre l'odeur inspirée et l'air expiré. De plus, lors de l'expiration passive, c'est-à-dire sans mobilisation des muscles expiratoires, l'air qui provient du fond des cavités nasales n'est pas expiré, ainsi l'exposition des molécules odorantes sur la muqueuse est plus longue (Settle et al., 2003 ; Goux, 2019).



En jaune : flux sortant ; En bleu : flux entrant

Figure 17 : Orientation des flux d'air entrant et sortant
(Crédit Image : CHALARD Clément)

Il peut également, en reniflant près du sol, entraîner des molécules peu volatiles vers son appareil olfactif (Settles et al., 2003 ; Goux, 2019) (Figure 17).

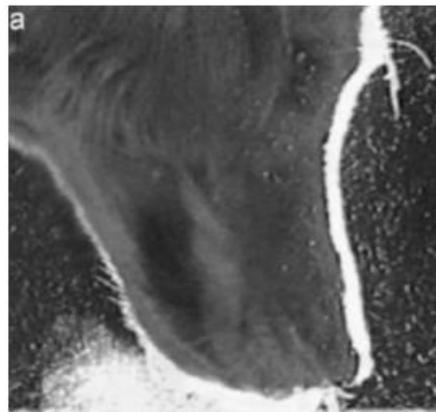


Figure 16 : Mise en mouvement des particules lors du reniflement (Settle et al., 2003)

Lors d'une phase de recherche active d'odeur, le chien se met à renifler/flairer à une fréquence significativement plus élevée tout en faisant des mouvements respiratoires de faible amplitude. Ainsi il renouvelle l'air seulement au niveau de son appareil olfactif et ces mouvements ne semblent pas contribuer à la ventilation à proprement parlé. Cela lui permet de renouveler constamment l'information olfactive sans que celle-ci aille se perdre dans les voies purement respiratoires par des mouvement amples et lents. C'est une capacité très utile notamment pour les chiens de piste, qui suivent une odeur tout en courant et donc doivent constamment renouveler l'information pour ne pas perdre la trace (Craven et al., 2010 ; Goux, 2019).

Enfin, il a été démontré que le chien utilise ses narines de manière indépendante. C'est-à-dire qu'il peut utiliser la droite sans la gauche et vice versa. Cette capacité lui permettrait de mieux détecter l'origine de l'odeur, en plus de l'orientation adéquate de sa tête. Il utiliserait même

plutôt sa narine gauche pour les odeurs familières et sa narine droite pour les odeurs a priori inconnues ou en phase de stress (Siniscalchi et al., 2011-2016-2017 ; Jenkins et al., 2018).

3) Perception de l'odeur

a. Réception

Comme dit précédemment (voir Première Partie : II.A)), les récepteurs olfactifs se situent dans la membrane des cils des cellules olfactives de la muqueuse, cils qui baignent dans un mucus au niveau de la lumière de la cavité nasale (Figure 18).

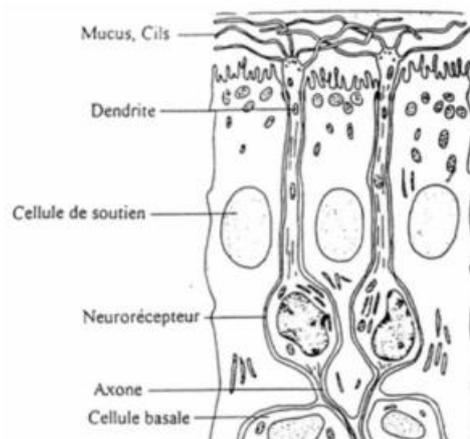


Figure 18 : Représentation schématique de la muqueuse olfactive (Holley, 1975)

Chaque cellule olfactive exprime un seul type de récepteur olfactif. Ces récepteurs sont des récepteurs transmembranaires couplés aux protéines G (RCPG) (Figure 19).

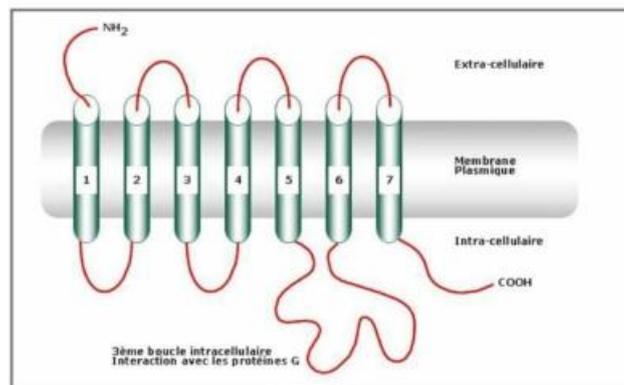


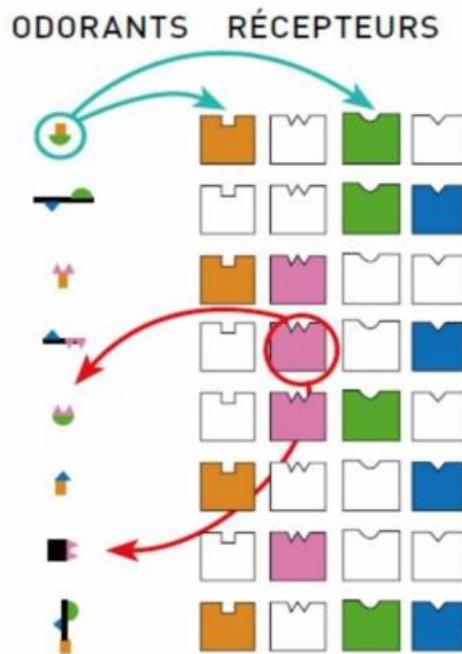
Figure 19 : Représentation schématique d'un RCPG (Crédit Image : PHARMACOMédicale.org [Internet])

Ils ont sept domaines transmembranaires, les domaines 1, 2, 6 et 7 semblent conservés entre tous les récepteurs tandis que les 3, 4 et 5 sont variables et permettent de reconnaître des centaines de molécules odorantes. Il y a environ 40 000 récepteurs sur une cellule olfactive (Vadurel et Gogny, 1995 ; Walensky et al. 1998 ; Goux, 2019).

La famille de gènes qui code pour les récepteurs olfactifs est la plus grande famille découverte jusqu'à présent chez les mammifères. On compte 1 300 gènes qui codent pour les récepteurs olfactifs chez le chien ce qui représente environ 3 % de son génome. À titre comparatif, il y a 802 gènes chez l'homme, soit 1 % de son génome environ, mais 50 % sont inactifs contre seulement 18 % chez le chien (Rouquier et Giorgi, 2007 ; Glusman et al., 2001 ; Malnic et al., 2004 ; Goux, 2019).

On peut distinguer deux groupes de récepteurs chez le chien. Le groupe I spécifiquement impliqué dans la fixation des molécules odorantes solubles et le groupe II pour les molécules odorantes à la solubilité moindre. (Quignon et al., 2012 ; Goux, 2019)

Le groupement chimique qui se fixe sur le récepteur s'appelle l'odotope. La liaison entre l'odotope et le récepteur est une liaison peu spécifique, faible et réversible. De cette manière, une molécule peut se lier à de nombreux récepteurs différents et un récepteur peut lier de nombreuses molécules différentes (Ache et Young, 2005 ; Goux, 2019) (Figure 20).



En bleu : Une molécule peut se fixer sur plusieurs récepteurs

En rouge : Un récepteur peut fixer plusieurs molécules

Figure 20 : Les liaisons non spécifiques entre odotopes et récepteurs (Ache et Young, 2005)

Pour atteindre les récepteurs olfactifs, les molécules odorantes doivent passer dans le mucus qui protège l'épithélium olfactif. Or, la plupart de ces molécules ont une partie hydrophobe. Il existe alors des transporteurs, les OBPs, dont le rôle va être de faciliter le passage des molécules dans le mucus pour atteindre les récepteurs (Maïbèche, 2013 ; Porteau, 2018).

b. Transduction

La transduction du signal est le terme employé pour définir la transformation du signal chimique résultant de la fixation de la molécule organique sur le récepteur olfactif, en un signal électrique que transmettra le neurone olfactif vers le bulbe olfactif (Jacquin-Joly, 2013 ; Porteau, 2018).

Les récepteurs olfactifs sont des RCPGs, lorsqu'une molécule odorante se fixe dessus leur conformation change et cela active une protéine intracellulaire dite protéine G. S'ensuit une cascade de transduction intracellulaire qui aboutit à la formation d'un potentiel d'action par l'ouverture de canaux ioniques.

Il y a deux voies de transduction pour les récepteurs olfactifs. Les deux débutent de la même manière. Une molécule odorante se lie au récepteur olfactif. L'activation du récepteur entraîne son changement de conformation. Le changement de conformation permet d'activer la protéine G. Cette protéine (G Golf) se trouve sous forme trimérique au repos, avec une sous-unité alpha et une sous-unité bêta-gamma. Son activation provoque la libération de la sous-unité alpha et c'est cette sous-unité alpha qui va conduire la suite de la cascade (Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Ache et Young, 2005 ; Jacquin-Joly, 2013 ; Jones et Reed, 1989).

C'est à ce moment que 2 voies sont possibles (Figure 21) :

- La voie de l'adénosine 3', 5'-monophosphate cyclique (AMPc) dans laquelle la sous-unité alpha active l'adénylate cyclase de type III. Cette enzyme synthétise de l'adénosine 3', 5' monophosphate cyclique (AMPc) avec de l'adénosine tri phosphate (ATP) comme substrat. L'AMPc, en quantité suffisante dans le milieu intracellulaire, permet alors l'ouverture de canaux ioniques spécifiques qui entraînent la dépolarisation de la cellule par l'entrée de sodium (Na^+) et de calcium (Ca^{2+}) (Jacquin-Joly, 2013 ; Porteau, 2018).
- La voie de l'inosine 1,4,5- triphosphate (IP3) dans laquelle la sous-unité alpha active la phospholipase C (PLC). Cette enzyme synthétise de l'IP3 avec du phosphatidylinositol-4,5-bisphosphate (PIP2) comme substrat. L'IP3, en quantité suffisante dans le milieu intracellulaire, permet l'ouverture de canaux calciques spécifiques qui entraînent la dépolarisation de la cellule par entrée de calcium (Rodriguez, 2013 ; Jacquin-Joly, 2013 ; Porteau, 2018).

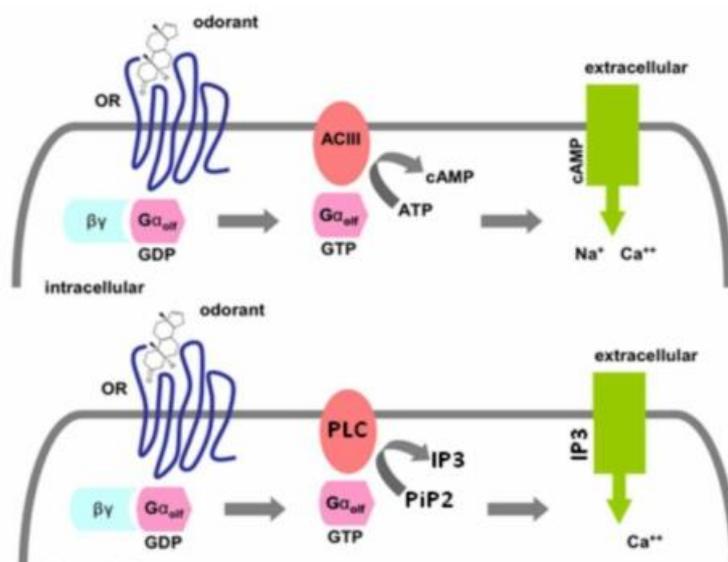


Figure 21 : Les deux voies de transduction du système olfactif
(Crédit Image : Cyberounds CME [Internet])

Plusieurs protéines G peuvent être activées par le même complexe molécule odorante – récepteur. Ainsi on a une vraie amplification du signal, une seule molécule peut entraîner la dépolarisation de la cellule et donc la genèse d'un potentiel d'action transmis vers les centres olfactifs (Lynch et Barry, 1989 ; Menini et al., 1995 ; Goux, 2019).

c. Transmission

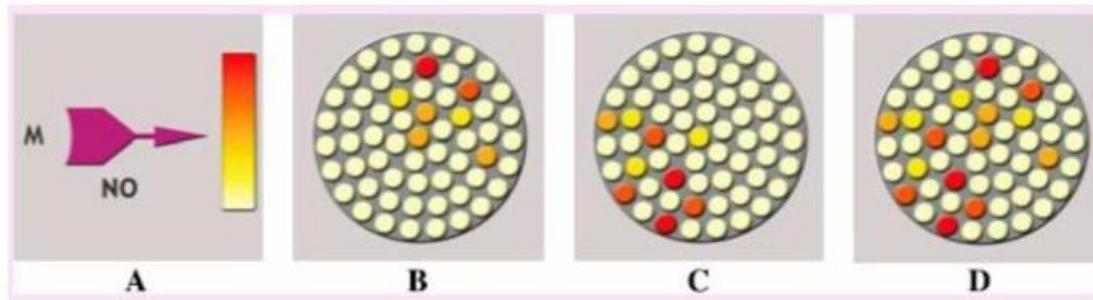
Lorsque que la dépolarisation est suffisamment forte, le potentiel de la membrane dépasse un seuil et un potentiel d'action est généré. Il se propage le long de l'axone jusqu'au bulbe olfactif au niveau des glomérules. Dans le bulbe olfactif, l'information va subir un traitement complexe (Holley, 2006 ; Kroely, 2011 ; Porteau, 2018 ; Goux, 2019).

L'intensité de l'odeur perçue dépend du nombre de récepteurs activés dans l'ensemble de la muqueuse et de la fréquence des potentiels d'actions que les cellules olfactives émettent, c'est à dire de la force de la dépolarisation qu'elles subissent. Il y a une sommation spatiale et temporelle de l'information. On parle de codage quantitatif, cela nous permet de faire la différence entre une odeur de faible intensité et une odeur de forte intensité (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019).

Le codage qualitatif, lui, correspond à l'interprétation de la représentation de l'odeur sur la muqueuse olfactive par les structures de traitement supérieur. C'est ce qui va lui conférer sa nature caractéristique. Un peu comme « une empreinte » particulière de l'odeur (Vadurel et Gogny, 1997 ; Coste, 2015 ; Duchamp-Viret, 2013).

Les cellules olfactives sont beaucoup plus nombreuses que les cellules mitrales et à panache des glomérules du bulbe olfactif. Ainsi, on a une convergence de nombreux axones sur une cellule mitrale ce qui permet une amplification conséquente du signal au détriment d'une perte d'information (Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Holley, 2006 ; Porteau, 2018).

Aussi, une cellule olfactive exprime au niveau de ses cils un seul type de récepteur et chaque glomérule du bulbe olfactif ne reçoit les axones que des neurones olfactifs qui expriment un seul et même type de récepteur. Ainsi, on obtient un patron, une carte d'activation des différents glomérules en fonction de l'odeur reçue. On parle de carte odotopique ou carte d'activation glomérulaire, et c'est elle qui permet le codage des différentes odeurs (Vadurel et Gogny, 1997 ; Shykind et al., 2004 ; Zou et al., 2001 ; Goux, 2019) (Figure 22).



Réponse d'un NO (neurone olfactif) à une molécule odorante M représentée par une couleur plus ou moins rouge

- B. Une molécule dite M1 active les glomérules. C'est l'ensemble des glomérules plus ou moins activés formant une « image » qui est interprétée comme l'odeur de M1
- C. Une autre molécule, appelée M2, active à son tour les glomérules conduisant à une image olfactive complètement différente.
- D. Les deux molécules M1 et M2 activent simultanément les glomérules. Les deux odeurs peuvent être reconnues distinctement ou bien on peut percevoir une odeur différente de celle des deux molécules.

Figure 22 : Représentation schématique de la carte odotopique dans la perception des odeurs (Meierhenrich et al., 2005)

En plus de cette organisation spatiale, le signal sera encore modulé grâce aux cellules périglomulaires et aux cellules granulaires du bulbe olfactif. Ces cellules sont des cellules inhibitrices qui ont une action intra et interglomérulaire et permettent donc de réguler le niveau d'activation du glomérule ainsi que celui des glomérules voisins (Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Porteau, 2018 ; Goux, 2019).

L'information est ensuite transmise vers le cortex olfactif puis vers les centres supérieurs. Il peut y avoir un relais thalamique qui contribue alors à la perception directe des odeurs ou encore un relais hypothalamique qui module l'activité des structures impliquées dans la mise en mémoire des odeurs et le contrôle des comportements (Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Holley, 1975-2006 ; Porteau, 2018).

Enfin, le bulbe olfactif reçoit aussi des projections d'origine centrale qui vont moduler l'information olfactive. On comprend alors que certains facteurs centraux comme la satiété ou la motivation vont entraîner des conséquences sur les performances olfactives (Kroely, 2011 ; Holley, 1975-2006) (Cf partie D.).

C. Caractéristiques de la fonction olfactive

On distingue deux composantes dans la sensation olfactive. La composante quantitative, qui permet de faire la différence entre odeur faible et odeur forte, et la composante qualitative qui correspond, elle, à la nature de l'odeur, à son identification (Duchamp-Viret, 2013 ; Porteau, 2018).

1) Seuil de perception

C'est la plus petite quantité ou la concentration la plus faible d'une molécule chimique qui, après fixation sur les neurones olfactifs entraînera une sensation olfactive. En dessous de cette valeur, la molécule chimique ne sera pas perçue par le système olfactif. Cette valeur n'est pas la même en fonction de la molécule odorante utilisée ou même de l'individu. Elle peut également varier avec l'apprentissage (Vadurel et Gogny 1997 ; Goux, 2019). D'une manière générale, le chien a des seuils de perception très bas, jusqu'à 100 000 000 de fois plus faibles que ceux de l'Homme (Combre 2006 ; Coste, 2015 ; Roqueplo, 2003 ; Vadurel et Gogny, 1997 ; Porteau, 2018).

2) Temps de latence

Il correspond au temps nécessaire pour que la sensation olfactive apparaisse. C'est-à-dire la durée entre l'entrée des molécules chimiques dans la cavité nasale et la transmission du signal du système olfactif périphérique vers les structures olfactives centrales qui coderont la nature de l'odeur. Ce temps est d'une demi-seconde environ chez le chien, principalement dû au fait que la transduction du signal nécessite une cascade de réaction. Cette cascade permet donc l'amplification au détriment du temps de latence (Vadurel et Gogny 1997 ; Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Goux, 2019).

Chez les insectes il est beaucoup plus court car c'est la molécule odorante elle-même qui ouvre directement le canal ionique à l'origine de la dépolarisation (Jacquin-Joly, 2013 ; Bhandawat et al., 2010).

3) Variations d'intensité

La sensation olfactive augmente proportionnellement à la concentration en molécules chimiques qui se fixent aux récepteurs, lorsque celle-ci est au-dessus du seuil de perception. En revanche, la sensation olfactive augmente moins rapidement que la concentration des molécules chimiques, c'est-à-dire que l'intensité réelle du stimulus (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Porteau, 2018).

La relation mathématique est la suivante : $S = k \times I^n$, avec S la sensation perçue, I l'intensité réelle du stimulus et k et n des constantes ($n < 1$).

La sensation olfactive optimale serait obtenue avec une intensité de stimulation 10 à 15 fois supérieure au seuil de perception (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019).

4) Adaptation et fatigue

Le seuil de perception pour une molécule chimique augmente en réponse à une stimulation longue ou à des stimulations nombreuses et rapprochées par cette même molécule. On parle alors d'adaptation. Ce phénomène est très marqué pour l'olfaction, le système olfactif répond moins bien voire plus du tout à la stimulation si celle-ci est trop longue ou répétée. Il reste cependant spécifique, c'est-à-dire que la perception des autres odeurs n'est pas affectée (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

La fatigue, elle, correspond à la réponse du système à la suite d'une activation des récepteurs par une grande quantité de molécules odorantes similaires durant une longue période de temps. La forte intensité de l'odeur perçue au départ (selon la relation mathématique présentée dans la partie précédente) diminue progressivement jusqu'à disparaître. On l'explique soit par une saturation des récepteurs, soit par leur désactivation temporaire à la suite d'une forte dépolarisation par exemple.

La sensibilité olfactive normale serait habituellement restaurée en trois minutes, mais cela peut prendre jusqu'à 30 minutes. Cette caractéristique est donc très importante à prendre en compte avec les chiens de travail. Une séance longue n'aura effectivement pas d'intérêt si l'appareil olfactif du chien est saturé (Vadurel et Gogny 1997 ; Goux, 2019).

5) Persistance

Il y a un laps de temps où la sensation olfactive est maintenue alors que la stimulation olfactive est terminée, on appelle cela le phénomène de persistance (Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

Outre le fait que les seconds messagers de la cascade de transduction doivent être éliminés pour que la sensation olfactive disparaisse, ce phénomène est surtout un phénomène de sommation. C'est-à-dire que plusieurs molécules odorantes, au départ en dessous du seuil de perception, peuvent finalement s'additionner et finir par dépasser le seuil et ainsi créer une sensation olfactive. Le nombre d'inhalations peut alors faire augmenter l'intensité perçue, à condition que la concentration de molécules odorantes reste faible (Zographos, 2017 ; Goux, 2019).

C'est grâce à ce phénomène que les chiens de pistage ont une efficacité redoutable. En effet, ils somment les informations olfactives le long de la piste ce qui leur permet ensuite de percevoir l'odeur et de retrouver la cible. Si la piste est trop courte la somme d'information peut ne pas être suffisante pour que le chien donne un résultat (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019).

D. Acuité olfactive du chien : facteurs de variation

1) Individuels

a. Espèce

D'un point de vue olfactif, il existe deux classes de Mammifères : les microsmatiques comme les primates humains et non-humains par exemple, et les macrosmatiques représentés chez de nombreuses espèces animales carnivores, herbivores et omnivores. On peut alors citer comme exemple de macrosmatiques les chiens ou encore les rongeurs.

Les macrosmatiques sont en fait les animaux disposant d'un système olfactif très développé. La distinction se fait sur des critères anatomiques et physiologiques tels que le nombre de récepteurs, la surface de muqueuse ou encore la taille de la zone olfactive par rapport à celle du cerveau dans son ensemble (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019) (Tableau II).

Tableau II : Caractéristiques olfactives de différentes espèces (D'après Vadurel et Gogny, 1997)

/ : Non précisé

Espèce	Pourcentage de la zone olfactive par rapport au cerveau total (en poids)	Surface de la muqueuse olfactive (en cm ²)	Nombre de cellules olfactives (M)
Homme	0.29	5	5
Rongeur	24.4	9.3	100
Chien	10.1	200	200
Porc	8.15	/	20
Bovin	7.15	/	/
Chat	5.9	20.8	67
Cheval	5.1	/	/

Les performances olfactives des rongeurs devancent celles du chien, on utilise d'ailleurs des rats de Gambie depuis les années 2000 pour la détection de la tuberculose sur échantillon salivaire ou encore pour la détection des mines au Mozambique et au Laos. En effet, pour le

déminage, le rat est trop léger pour pouvoir déclencher les mines, ce qui lui donne un avantage certain (APOPO Détection Rats Technology, 2019 ; Leitch et al, 2013).

L'analyse du génome olfactif montre elle aussi que les rongeurs semblent surpasser le chien en termes de capacité olfactive (Tableau III). Elle montre également qu'il ne faut pas se focaliser sur le nombre de gènes mais qu'il faut prêter attention aussi au nombre de pseudo gènes. En effet, certains gènes deviennent inactifs à la suite de mutations. On parle alors de pseudo gènes, et, comme ils sont inactifs, ils n'apportent aucune plus-value à la fonction olfactive. On voit même ici que l'éléphant dispose d'un très grand génome olfactif, et que, malgré une part importante de pseudogènes, il se place également devant le chien et même devant les rongeurs (Quignon et al., 2005 ; Galibert et al., 2006 ; Porteau, 2018).

Tableau III : Nombre de gènes et pseudogènes olfactifs chez différentes espèces (D'après Quignon et al., 2005 ; Galibert et al. 2016)

Espèce	Gènes intacts	Pseudogènes	Total	Pourcentage de pseudogènes
Éléphant	1948	2230	4178	53
Rat	1234	311	1545	20
Souris	913	296	1209	25
Chien	856	238	1094	22
Homme	391	464	855	54
Chat	677	375	1052	35

On remarque notamment que plus de la moitié des gènes olfactifs de l'Homme sont en fait des pseudo gènes.

b. Race

On retrouve également des variations de capacité olfactive au sein de l'espèce canine elle-même, en fonction de la race (Tableau IV).

En effet il existe des grosses différences morphologiques entre les différentes races de chien et celles-ci vont entraîner des conséquences sur le système olfactif, notamment sur la surface

de muqueuse, le nombre de récepteurs et même sur le courant aérien qui passe dans les narines (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019).

Tableau IV : Caractéristiques olfactives de différentes races de chien (D'après Vadurel et Gogny, 1997)

/ : Non précisé

Races	Surface de muqueuse olfactive (en cm ²)	Nombre de cellules olfactives (Millions)
Saint Hubert	/	300
Berger Allemand	200	225
Labrador	190	220
Fox terrier	85.3	147
Cocker	67	140
Teckel	80	125
Bouledogue	75	100

Un des points clés va être la morphologie du museau, et, de manière plus générale la morphologie crânienne (Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

Un museau très long de type dolichocéphale limite la quantité d'air qui atteindra la muqueuse olfactive. À l'inverse un museau court et aplati de type brachycéphale réduit le débit aérien et empêche la bonne circulation d'air dans les cavités nasales, en plus de limiter la surface de la muqueuse. Ce sont donc les chiens à museau moyen, dit mésocéphale, qui présentent la morphologie optimale pour la fonction olfactive, et c'est donc eux que l'on privilégie pour le travail de détection (Kroely, 2011 ; Rosell, 2016 ; Porteau, 2018).

Aussi, certaines races comme les chiens d'arrêt et les chiens rapporteurs ont été sélectionnées pour une utilisation « olfactive », elles sont donc connues pour leur odorat particulièrement performant (Roqueplo, 2003 ; Porteau, 2018) mais également pour leur proximité émotionnelle avec l'Homme (qui favorise le codage de la récompense représentée par le plaisir du maître) et leurs capacités d'apprentissage associatif et de mémorisation rapide.

Il semblerait également qu'une muqueuse olfactive pigmentée soit synonyme d'un meilleur odorat (Moulton, 1960 ; Kroely, 2011 ; Roqueplo, 2003 ; Porteau, 2018 ; Goux, 2019).

Outre l'aspect morphologique de la race qui lui confère plus ou moins de qualités olfactives, il est important de s'intéresser au caractère du chien qui peut lui aussi être relié à la race et faire qu'un chien soit efficace ou non dans le travail olfactif. Certains auteurs ont compilé ces facteurs comportementaux en fonction des races (Jamieson et al., 2017 ; Goux, 2019) (Tableau V).

Tableau V : Attributs comportementaux associés à quelques races de chiens (D'après Jamieson et al., 2017)

Catégorie de chiens	Attributs communs à la race
Chiens rapporteurs : · Labrador Retriever · Springer	<ul style="list-style-type: none"> - Agressivité faible - Coopératif avec l'Homme - Dressage facile - Instinct chasseur
Chiens de berger : · Border Collie · Berger Australien · Berger Allemand	<ul style="list-style-type: none"> - Dressage facile - Très joueur - Très intelligent - Coopératif avec l'Homme - Intrépide - Solutionneur indépendant
Chiens de terriers : · Jack Russel Terrier	<ul style="list-style-type: none"> - Dressage difficile - Très énergique - Coopératif avec l'Homme - Concentration difficile - Très joueur - Instinct très chasseur - Possiblement agressif
Lévriers : · Greyhound	<ul style="list-style-type: none"> - Fragile (blessure) - Dressage difficile - Exclusif avec son maître - Travail en laisse
Chiens courants : · Saint- Hubert · Beagle	<ul style="list-style-type: none"> - Sociable - Têtu - Dressage plus ou moins difficile - Exclusif avec son maître - Travail en laisse

Le terme solutionneur indépendant indique que le chien aura tendance à trouver seul la solution aux problèmes qui lui sont présentés.

Enfin, les différences génétiques entre les races de chien auraient également un rôle à jouer (Porteau, 2018 ; Goux, 2019). Ainsi, certains allèles ayant conduit à des pseudogènes seraient « race-spécifiques » (Tacher et al., 2005 ; Goux, 2019).

c. Individu

Même si l'on vient de voir que la race du chien lui confère plus ou moins de qualités olfactives, ce n'est absolument pas un critère absolu pour avoir un chien de travail efficace. En effet le choix de l'individu est au moins tout autant important car il existe, au sein d'une race donnée, des variations individuelles et notamment comportementales qui permettront la plus ou moins bonne adéquation entre un chien, son maître, son environnement et le travail qui lui sera demandé (Jamieson et al., 2017 ; Goux, 2019).

Il apparaît évident que le chien doit être en bonne santé, sans pathologie particulière (Kroely, 2011). Le chien doit être proche de l'Homme pour être attentif lors du processus de dressage et lorsqu'il reçoit une consigne de la part de son maître. Cependant, le chien ne doit pas être dépendant de son maître sinon il ne prendra pas les initiatives nécessaires au travail qu'on lui demande. Il faut en fait un juste milieu avec un chien suffisamment proche de son maître pour lui obéir mais suffisamment indépendant pour mener à bien son travail (Rooney et Bradshaw, 2004 ; Adamkiewicz et al. 2013 ; Rebmann et al., 2000 ; Goux, 2019).

Un chien intrépide serait plus efficace par rapport à un chien plus peureux qui sera alors plus anxieux et vite distrait. Il faudrait alors beaucoup plus de temps pour apprendre une tâche à un chien peu intrépide (Svartberg et al., 2002 ; Goux, 2019). Le chien doit être correctement habitué à toutes sortes de stimuli extérieurs et garder son calme face à eux. Ainsi, il sera apte à travailler dans n'importe quel environnement (Hurt et Smith, 2009 ; Goux, 2019).

Un point essentiel est le jeu. Le chien doit être joueur ou alors avoir un intérêt très fort pour la nourriture. Le dressage passe en majeure partie par le jeu. La gourmandise de certains chiens qui sont sensibles à une récompense alimentaire peut compenser un attrait moyen pour le jeu. Dans tous les cas, il faut que le chien ait une motivation sans faille pour la tâche qu'on lui demande. Cette motivation est le plus souvent représentée par le jeu, et parfois par la nourriture (Kroely, 2011 ; Porteau, 2018).

En 2004, une étude a été menée par Rooney et Bradshaw auprès de 244 maîtres chien anglais et les 10 caractéristiques qui ressortent nécessaires pour un chien de travail sont : l'acuité olfactive, la stabilité comportementale, la tendance à flairer, l'agilité, la tendance à ne pas se

laisser distraire, la santé, l'endurance, la motivation, l'instinct de chasse, et l'intérêt pour la récompense (Rooney et Bradshaw, 2004).

Enfin, le chien va être très sensible au comportement de son maître. Il faut alors créer une vraie relation de binôme et en général un chien doit travailler toujours avec le même individu afin de conserver une motivation sans faille (Kerepesi et al., 2005 ; Mariti et al., 2013 ; Goux, 2019).

2) Physiologiques

a. La nutrition

Il y a un lien direct entre la prise alimentaire et l'acuité olfactive. Dans la nature un animal qui n'a pas mangé va mettre ses sens à l'affût pour optimiser sa recherche alimentaire. Cela fonctionne aussi pour les performances olfactives du chien. Ainsi, la faim augmente son acuité olfactive alors que la satiété la diminue (Kroely, 2011). Cette propriété a aussi été démontrée chez le rat, pour qui le jeûne améliore les performances olfactives (Aime et al., 2007 ; Goux, 2019, Ferry et Duchamp-Viret, 2014 ; Ferry 2014).

Il est donc intéressant de ne pas nourrir un chien avant un entraînement ou un travail olfactif, d'autant plus que la diminution de l'acuité olfactive se prolonge lors de la digestion au moins pendant la première heure après le repas (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019). Attention cependant, un jeûne trop long peut rendre l'animal agressif et distrait.

En effet l'orexine, qui favorise la prise alimentaire, et la leptine, qui est un marqueur de satiété, sont deux molécules produites par l'hypothalamus et qui semblent capables de moduler l'activité neuronale du bulbe olfactif car ce dernier possède des récepteurs à l'orexine. C'est par ce mécanisme que la satiété modulerait les performances olfactives (Julliard et al, 2007 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

Altom et al., en 2003, ont montré que la qualité de l'alimentation influe également sur les performances olfactives. Ainsi, une alimentation exclusive riche en acides gras saturés de 18 chiens mâles Pointer cause une diminution progressive de leurs performances olfactives. Au bout de 12 semaines ils ont même observé une anosmie totale. À l'inverse une alimentation riche en acides gras insaturés améliorerait les performances (Altom et al., 2003 ; Goux, 2019).

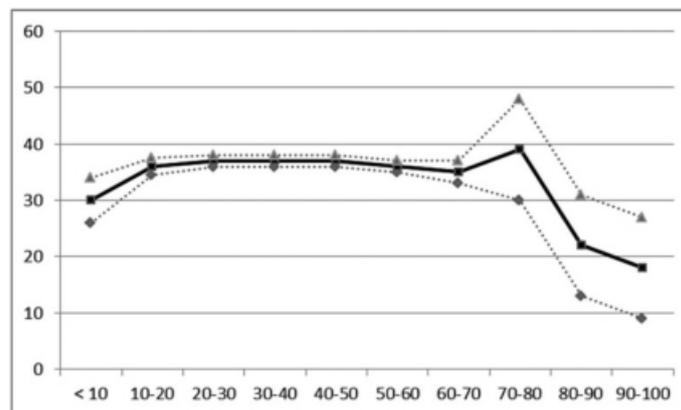
Depuis cette première étude, un nouveau travail a été mené et se positionne quelque peu en contradiction avec le premier (Angle et al., 2014). La conservation des acides gras alimentaires est difficile du fait de leur oxydation rapide, je pense alors que deux protocoles qui seraient différents par leur méthode de conservation peuvent facilement donner des résultats contradictoires, de même si les acides gras utilisés ne sont pas strictement les mêmes.

En tout cas, on sait que la consommation de graisse alimentaire peut modifier la composition de certains tissus de l'organisme et il semblerait alors qu'elle influe sur la muqueuse olfactive (Kroely, 2011 ; Coste, 2015 ; Altom, 2003 ; Porteau, 2018).

Enfin, la déshydratation altère la qualité du mucus qui protège la muqueuse olfactive et entraîne son assèchement. Ce mucus joue en plus un rôle dans la fixation des molécules sur les récepteurs olfactifs donc la déshydratation altère l'ensemble de la fonction olfactive (Jones et al., 2004 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019). Pour rappel, les besoins hydriques du chien varient de 60 à 300 millilitres par kilogramme et par jour.

b. L'âge

D'une manière générale, que cela soit chez l'Homme (Figure 23) ou chez le chien, les facultés sensorielles diminuent avec l'âge et c'est effectivement le cas pour l'olfaction du chien.



Scores d'identification des odeurs obtenus (en ordonnées) en fonction de l'âge (en abscisse).
Le score moyen est en trait plein, l'écart interquartile est en traits pointillés.

Figure 23 : Diminution des performances olfactives avec l'âge chez l'Homme (Bonfils, 2016)

Les jeunes chiens disposent d'une meilleure acuité olfactive (Combre, 2006 ; Hirai et al., 1996 ; Porteau, 2018) et on estime que c'est à partir de l'âge de 14 ans que l'épithélium olfactif dégénère et commence réellement à s'atrophier, avec une accélération du processus à partir de 17 ans. On observe une diminution du nombre de neurones olfactifs et du nombre de cils pour chaque neurone, ainsi qu'une dégénérescence du bulbe olfactif avec l'âge. On peut alors supposer que la faculté des neurones olfactifs à se régénérer diminue, ou encore que ce soit leur dégénérescence qui s'accélère.

c. Le sexe

Bien que la sensibilité olfactive des femelles fluctue au rythme du cycle menstruel, ces dernières ont un système olfactif plus sensible que les mâles même si dans certaines tâches (comme le pistage) les chiens mâles sont plus efficaces (Wells et Hepper, 2003). Des études ont montré que les performances olfactives maximales des femelles sont corrélées à un taux élevé d'œstrogènes et à un taux de progestérone faible (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019). On observe aussi plus de cellules mitrales dans le bulbe olfactif chez les femelles, ce qui pourrait être à l'origine de la différence de sensibilité (Wei et al., 2008 ; Goux, 2019).

Chez les mâles, il a été montré qu'une injection de testostérone induit une augmentation des performances de détections olfactives. A l'inverse, la castration induit une diminution des performances de détection olfactive (Vadurel et Gogny, 1997 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

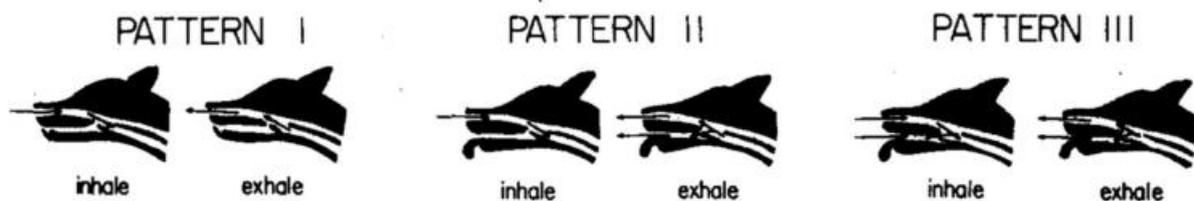
En pratique, les chiens de travail sont très majoritairement des mâles même si la sensibilité des femelles est supérieure. On peut l'expliquer car les femelles ne peuvent pas être utilisées pendant les chaleurs et peuvent distraire voire-même provoquer des conflits au sein des mâles du groupe (chenil). Leur stérilisation pourrait régler le problème mais elle a un coût et ne peut pas être faite à n'importe quel moment (Porteau, 2018 ; Goux, 2019).

d. La condition physique

La condition physique du chien semble avoir un impact sur leurs performances olfactives. Ainsi, un chien qui n'a pas une condition physique entretenue par un entraînement régulier montre des performances de détection olfactive inférieures (jusqu'à 64 %) à celle d'un chien entraîné à l'effort physique (Altom et al., 2003 ; Goux, 2019).

L'un des mécanismes qui entre en jeu est l'halètement. En effet, lors d'un effort, le chien régule sa température corporelle par l'halètement. Il est impossible pour un chien d'haler et de renifler/flairer en même temps. Ainsi quand le chien fournit un effort intense, il va beaucoup haleter et moins renifler/flairer, le flux d'air qui arrive au niveau de la muqueuse olfactive diminue et donc ses performances diminuent (Gazit et Terkel, 2003 ; Kroely, 2011 ; Goux, 2019). S'il est moins performant, la recherche peut être plus longue et donc lui demander un effort plus conséquent qui le fera haleter de manière plus importante. Cependant, avec un entraînement adapté, les chiens sont capables d'augmenter leur fréquence de reniflement/flairage même quand leur fréquence d'halètement augmente. Ainsi ils arrivent à conserver leurs performances olfactives plus longtemps, dans la limite du raisonnable car il a été montré que dans tous les cas, un effort physique de 30 minutes diminue leur acuité olfactive (Angle et al., 2014 ; Gazit et Terkel, 2003 ; Goux, 2019).

Si on veut résumer, le chien respire selon trois modes différents (Figure 24). Au repos, il inspire et expire par le nez, donc un maximum de molécules odorantes peuvent atteindre la muqueuse olfactive. Lors d'un exercice ou d'une élévation de sa température corporelle il se met à inspirer par le nez et expirer par le nez et la bouche. Si cela ne suffit pas, alors il inspire et expire par le nez et la bouche. Ce mécanisme de thermorégulation s'appelle le halètement, le flux aérien passe par la cavité buccale, au détriment de la cavité nasale et donc de la fonction olfactive (Goldberg-Marcia et al., 1981).



I : au repos ; II : lors d'une thermorégulation modérée ; III : lors d'une thermorégulation intense

Figure 24 : Les différents modes de respiration chez le chien (D'après Goldberg-Marcia et al., 1981)

3) Environnementaux

a. La météo

La météo va à la fois jouer directement sur les capacités olfactives mais également sur les molécules odorantes puisque celle-ci sont transportés par les courant aériens eux-mêmes sous l'influence des conditions météorologiques.

En effet, la chaleur dessèche la muqueuse et perturbe la qualité du mucus, de plus elle fait haleter le chien et donc fait varier le flux d'air qui vient jusqu'à la muqueuse olfactive.

Un vent sec, lui aussi, dessèche la muqueuse et diminue les performances olfactives. De plus il modifie les courants aériens qui transportent les molécules odorantes.

La pluie et la neige peuvent provoquer l'inhalation de gouttelettes. Celles-ci se déposent sur le mucus et forme une barrière aqueuse, gênant l'interaction des molécules odorantes avec ce dernier et donc avec les récepteurs olfactifs. Une pièce très humide aura le même effet et diminuera donc aussi les performances olfactives, en plus de modifier la mécanique des courants aériens. Ceci est à nuancer car il a été montré qu'un temps humide et brumeux favorise la propagation dans l'air des molécules organiques volatiles hydrophiles.

La volatilité des molécules diminue quand la pression atmosphérique augmente, ainsi les performances olfactives diminuent quand la pression atmosphérique augmente.

Enfin, il semblerait que les orages, en modifiant brutalement les champs électromagnétiques et la pression atmosphérique, exercent une influence négative sur les performances olfactives du chien (Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019).

b. La pollution

Les polluants environnementaux sont souvent irritants ou destructeurs pour les muqueuses et notamment pour la muqueuse olfactive, ils vont donc altérer les performances olfactives (Tableau VI). Par exemple, l'exposition passive d'un chien au tabac va diminuer sa sensibilité olfactive (Vadurel et Gogny, 1997). Le tabac est sûrement l'exemple le plus parlant mais il existe de nombreux polluants qui peuvent perturber le système olfactif, que ce soit suite à une exposition aiguë, ou bien suite à une exposition chronique (Kroely, 2011 ; Goux, 2019).

De la même manière, tout facteur pro inflammatoire aboutissant à une altération de la muqueuse, tel que des bactéries ou des virus, entraînera une perturbation des mécanismes de l'olfaction.

Certains chiens de travail comme les chiens de recherche en décombres par exemple, sont plus exposés aux polluants que d'autres.

Tableau VI : Exemples de substances délétères pour la fonction olfactive (D'après Coste, 2015)

Classe	Molécules
Solvant	Toluène ; Styrène
Fongicide	Carbamate ; Triadiméfon
Herbicide	Dichlobénil
Insecticide	Hexachlorocyclohexane
Fumée de tabac	Nitrosodiéthanolamine
Parfumerie	Méthylindole ; Acétaldéhyde
Métal (exposition prolongée)	Cadmium ; Chrome ; Plomb ; Mercure ; Nickel ; Argent ; Zinc
Composés organiques (exposition prolongée)	Acétone ; Benzène ; Menthol

Autres (exposition prolongée)	Ammoniac ; Chloré ; Fluorure
-------------------------------	------------------------------

4) Iatrogènes

Les médicaments entraînant des perturbations du système olfactif sont répertoriés dans le Tableau VII.

La plupart des anesthésiques utilisés en médecine vétérinaire (benzodiazépines, kétamine, propofol, isoflurane) entraînerait également des troubles de l'odorat (Nores et al., 2000 ; Goux, 2019).

Tableau VII : Médicaments et conséquences sur la fonction olfactive chez l'Homme (D'après Vadurel et Gogny, 1997 ; Goux, 2019)

Classe	Molécules	Dysosmie
Médicament Cardiovasculaires	Diltiazem	Hyposmie
	Dipyramidole	Parosmie
	Enalapril	Parosmie
	Captopril	Parosmie
	Métoprolol	Anosmie
	Acebutolol	Anosmie
	Amlodipine	Hyposmie
	Féلودipine	Hyposmie
Antibiotiques	Néomycine	Anosmie
	Doxycycline	Anosmie
	Streptomycine	Cacosmie
	Tyrothricine	Hyposmie
Antihelminthique	Lévamisole	NP
Chimiothérapie	Cisplatine	Anosmie

	Cytosine arabinoside Methotrexate	Anosmie Hyposmie
Antithyroïdien	Carbimazol Méthylthiouracile Propylthiouracile	Anosmie Anosmie Hyposmie
Antalgique	Morphine	Hyposmie
Anesthésiques Locaux	Tétracaine	Anosmie
Interférons	Interféron alpha	Anosmie

De même, il a été prouvé que le métronidazole diminue l'acuité olfactive chez le chien à la dose de 25 milligrammes par kilogramme, per os, toute les 12 heures (Jenkins et al., 2016), tout comme la dexaméthasone et l'hydrocortisone (Ezeh et al., 1992).

On parle de parosmie quand la perception olfactive ne correspond pas à la stimulation, d'hyposmie quand la sensibilité globale aux odeurs est diminuée et d'anosmie quand il y a perte (partielle ou totale) de l'odorat.

Ces données montrent qu'il est important de surveiller les médicaments que l'on donne aux chiens et de les mettre au repos suffisamment longtemps après traitement pour qu'ils récupèrent une fonction olfactive normale avant la reprise de leur travail. Ces interférences médicamenteuses posent problèmes dans le cas de maladie chronique et le chien de travail devra alors anticiper sa retraite.

III. Choix du modèle

Le dalmatien est un chien d'origine croate, qui, auparavant, était utilisé pour ouvrir le chemin aux convois équestres (Bauer et Lemo, 2008). De nos jours, cette race s'est répandue dans le monde et le dalmatien est devenu, principalement, un chien de compagnie.

Pour notre étude, le Dalmatien représente l'une des races les plus touchées par la surdité congénitale, donc une race idéale pour étudier une éventuelle compensation de ce déficit

sensoriel congénital. De plus, le dalmatien est un chien de type mésocéphale, doté d'un appareil olfactif a priori performant, ou du moins non limité par sa morphologie.

L'avenir d'un chien qui naît avec une surdité bilatérale est souvent compromis. Son éducation délicate effraie les futurs propriétaires et entraîne souvent la demande d'euthanasie par l'éleveur, dès son plus jeune âge, alors qu'il n'est qu'un chiot. Si nous arrivons à montrer que de bonnes performances olfactives compensent ce handicap (que leur déficit d'audition est compensé par un système olfactif plus performant que la normale, ou par exemple par des performances olfactives améliorées en milieu perturbé du fait de leur insensibilité aux stimuli sonores), alors peut être que ces chiens pourront être utilisés comme chien de travail. Ainsi, on éviterait leur euthanasie précoce alors que, même sourds, ils sont généralement en pleine santé.

Dans la partie suivante, nous allons d'abord nous intéresser au système auditif afin de comprendre le mécanisme de la surdité congénitale neurosensorielle, et comment la diagnostiquer. Puis nous étudierons les méthodes de formation d'un chien au travail olfactif dans le but de les transposer aux chiens sourds. Et enfin nous parlerons de plasticité cérébrale et des compensations sensorielles déjà mises en évidence.

A. Dalmatien et surdité neurosensorielle congénitale

1) Anatomie de l'oreille

L'oreille interne est un organe qui concentre deux fonctions : la fonction auditive (cochlée) et la fonction d'équilibration (labyrinthe). Nous parlerons par la suite uniquement de la fonction auditive.

L'audition du chien est nettement plus performante que celle de l'Homme avec des fréquences audibles de 67 à 45 000 Hertz alors que les fréquences audibles pour l'homme s'étendent plutôt de 20 à 20 000 Hertz.

On divise l'oreille en trois régions : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

a. Externe

Elle s'étend du pavillon jusqu'à la membrane du tympan, cette dernière étant la frontière entre oreille externe et oreille moyenne. Le pavillon est mobile chez le chien et il est relié à la membrane du tympan par le méat acoustique externe, aussi appelé conduit auditif externe (Figure 25).

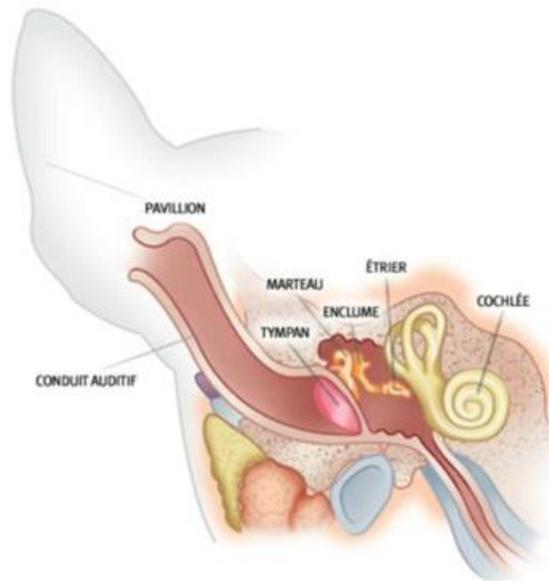


Figure 25 : Représentation schématique de l'oreille d'un chien (Crédit Image : billeco.com [Internet])

Les ondes sonores arrivent de l'extérieur, elle se concentrent au niveau du pavillon qui fait office d'entonnoir, puis passe dans le méat acoustique pour se diriger vers la membrane du tympan (Gaudron, 2015).

b. Moyenne

L'oreille moyenne (Figure 26) se compose de trois osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Leur rôle est de transmettre les vibrations de la membrane du tympan vers le vestibule et la cochlée.

Le marteau est fixé à la membrane du tympan, il s'articule avec l'enclume qui elle-même s'articule avec l'étrier. L'étrier, une fois mis en mouvement, va alors mobiliser la fenêtre du vestibule et ainsi transmettre la vibration.

La fenêtre du vestibule ou fenêtre ovale est la membrane qui sépare l'oreille moyenne du vestibule et la fenêtre de la cochlée ou fenêtre ronde est la membrane qui sépare l'oreille moyenne de la cochlée.

L'oreille moyenne est également ouverte sur un petit conduit, la trompe auditive ou trompe d'eustache, qui lui-même est relié au pharynx et permet d'équilibrer les pressions entre l'oreille moyenne et l'atmosphère (Gaudron, 2015).

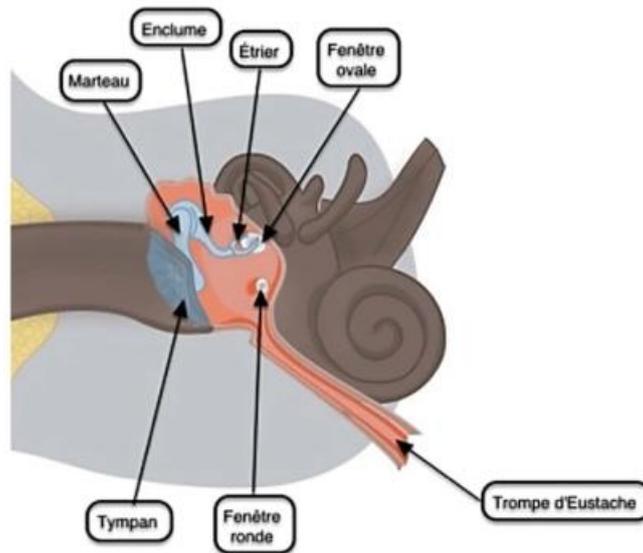


Figure 26 : Représentation schématique de l'oreille moyenne (Crédit Image : learn-electroacoustics.eu [Internet])

c. Interne

L'oreille interne est située dans des cavités osseuses au niveau de l'os temporal et se compose de l'appareil vestibulaire et de la cochlée. Cela forme un labyrinthe de conduits et de canaux contenant un liquide (Figure 27). L'appareil vestibulaire correspond à l'organe de l'équilibre en se comportant comme un accéléromètre. La cochlée, en forme de coquille d'escargot, correspond à l'organe de l'audition.

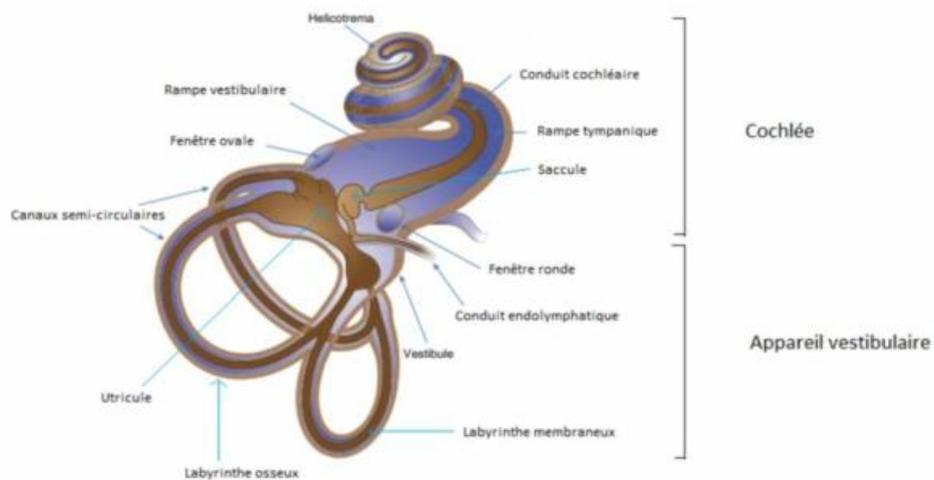
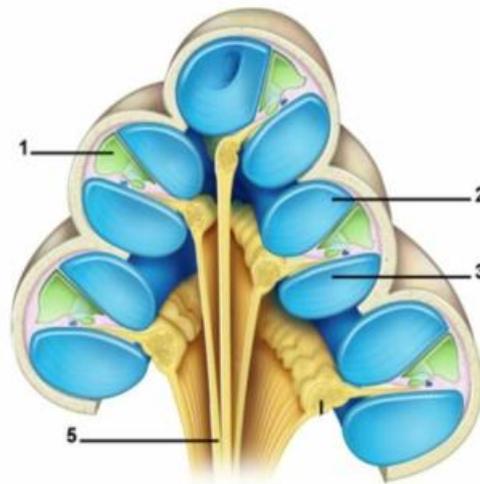


Figure 27 : Représentation schématique de l'oreille interne (Tobias et Paterson, 2012)

Sur une coupe on distingue trois cavités différentes dans la cochlée : la rampe vestibulaire, la rampe tympanique et le conduit cochléaire (Figure 28).



1 : Canal cochléaire ; 2 : Rampe vestibulaire ; 3 : Rampe tympanique ; 5 :
Nerf auditif

Figure 28 : Représentation schématique de cochlée en coupe transversale (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

Les deux rampes sont remplies d'un liquide appelé périlymphe. Le conduit cochléaire s'intercale entre les deux rampes, il est de section plus petite et rempli d'un liquide appelé endolymphe. Le nerf cochléaire, qui transmet l'information auditive au système nerveux central, prend naissance à la base de la cochlée. L'héliotrema correspond au sommet de la cochlée.

d. Cas du dalmatien sourd

Dès le premier jour de vie, une dégénérescence des structures de l'oreille interne se développe et peut aboutir, anatomiquement, à une malformation de la cochlée et du saccule. On parle de dégénérescence cochléo-sacculaire ou encore de dysplasie de Scheibe (Sampaio et al., 2010 ; Gaudron, 2015).

La majorité des études sur cette dysplasie ont été faites sur le dalmatien, les autres races restant peu étudiées. La littérature s'accorde cependant pour dire que cette dégénérescence est progressive et étroitement liée à l'âge de l'animal, indépendamment de la race. C'est à dire que peu importe la race touchée par cette dysplasie, le phénomène restera évolutif (Anderson et al., 1968 ; Branis et Burda, 1985 ; Mair, 1976 ; Niparko et Finger, 1997 ; Hiraide et Paparella, 1988 ; Coppens et al., 2001).

2) Histologie de l'oreille

a. Organe de Corti

Au niveau du plancher du conduit cochléaire (qui est en fait la lame basilaire de la cochlée) se trouve une structure histologique particulière : l'organe de Corti (Figure 29). C'est dans cet organe que se situent les cellules sensorielles de l'audition, qui vont transformer le signal mécanique en signal électrique qui sera transmis aux structures du système nerveux central impliquées dans le traitement cognitif des informations auditives.

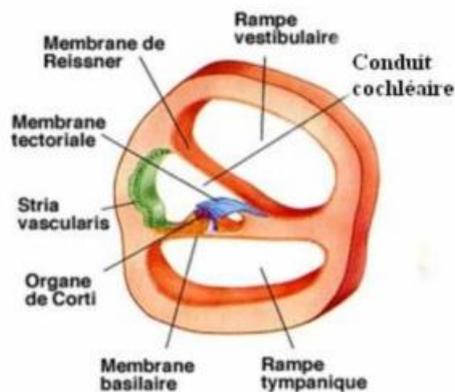


Figure 29 : Représentation schématique d'une section de cochlée en coupe transversale (Crédit Image : vetopsy.fr [Internet])

Ces cellules sensorielles sont des cellules ciliées dont les cils se projettent dans la lumière du conduit cochléaire. Il y a trois rangées de cellules ciliées dites externes (coté ligament spiral), et une rangée dite interne (coté ganglion spiral) (Figure 30). Le ligament spiral forme, avec la stria vasculaire, la paroi latérale du conduit cochléaire.

Elles sont recouvertes par une membrane semi-mobile : la membrane tectoriale, sur laquelle les cils des cellules ciliées externes se rattachent et dont le mouvement permettra la genèse du signal électrique.

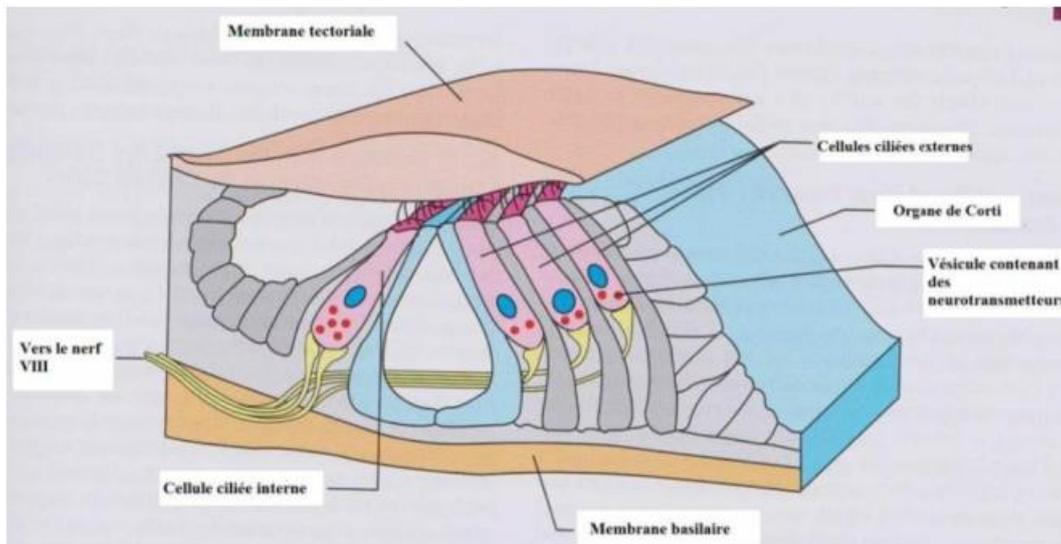


Figure 31 : Représentation schématique de l'organisation de l'appareil de Corti (Klein, 2013)

L'organe de Corti est en fait le neuroépithélium contenant les cellules sensorielles de l'audition (Figure 31).

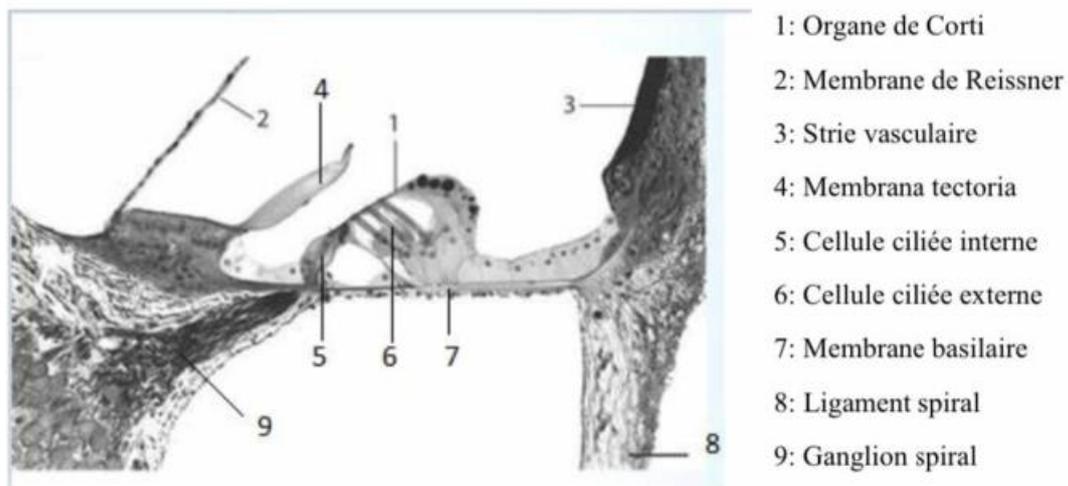


Figure 30 : Coupe transversale d'un organe de Corti de cobaye (Anderson et al. 1968)

b. Strie vasculaire

Si l'organe de Corti représente le plancher du conduit cochléaire, la strie vasculaire, elle, recouvre sa paroi latérale. En effet, c'est un tissu épithélial, accolé au ligament spiral et qui tapisse la paroi latérale du conduit cochléaire.

De la lumière du conduit vers le ligament spiral on trouve trois types de cellules (Figure 32) :

- Les cellules marginales, de provenance ectodermique, avec un grand nombre de mitochondries
- Les mélanocytes, ou cellules intermédiaires, en provenance de la crête neurale
- Les cellules basales, de provenance mésodermique et qui sont directement en continuité avec le ligament spiral.

Entre les cellules basales et les cellules marginales on trouve un dense réseau de capillaires.

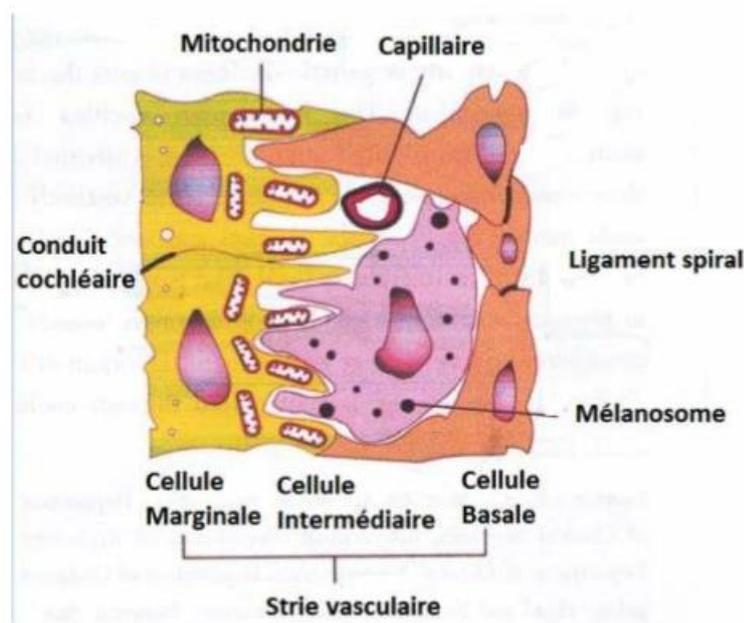


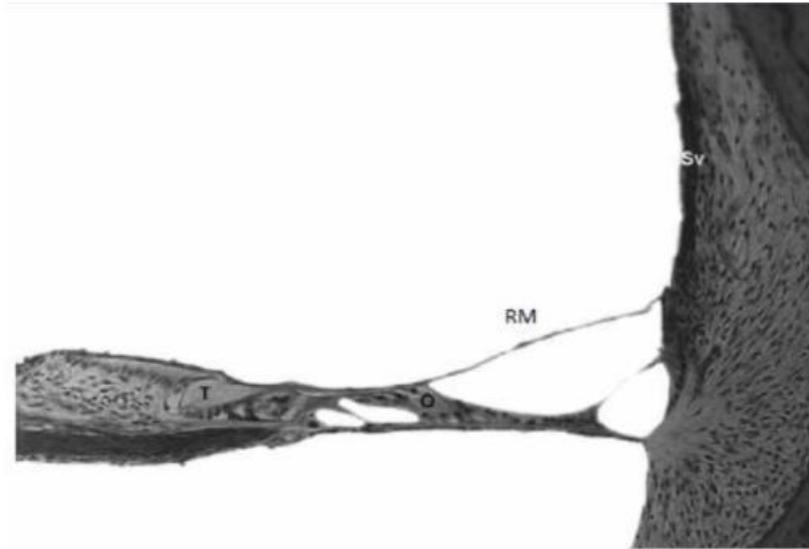
Figure 32 : Représentation schématique de la strie vasculaire
(Branis et Burda, 1985)

Les cellules marginales et les cellules basales sont reliées entre elles par des jonctions serrées. De cette manière, la strie vasculaire est parfaitement isolée de l'endolymphe du conduit cochléaire (Jin et al., 2009).

Les mélanocytes permettent le développement de cette strie vasculaire, ils soutiennent le réseau de capillaires et permettent également la différenciation des cellules marginales et la formation des digitations. Ils jouent un dernier rôle actif et primordial dans la formation et le maintien de l'endolymphe (Hoshino et al., 2000 ; Gaudron, 2015). Leur migration puis leur développement à partir de la crête neurale est sous la dépendance d'une multitude de facteurs, eux même dépendants de l'expression de nombreux gènes (Alhaidari et al., 1999).

c. Cas du dalmatien sourd

C'est Sampaio qui a établi la chronologie des lésions histologiques qui se mettent en place progressivement lors de la dysplasie cochléo-sacculaire du dalmatien (Figure 33).



Sv : Strie vasculaire ; RM : Membrane de Reissner ; O : Organe de Corti ; T : Membrane tectoriale

Figure 33 : Coupe transversale d'une cochlée de Dalmatien sourd (Niparko et Finger, 1997)

La chronologie est la suivante (Figure 34) : (Sampaio et al., 2010 ; Gaudron, 2015)

Les lésions semblent se mettre en place dès la naissance puisqu'on observe déjà à J5 une absence de digitations sur les cellules marginales de la strie vasculaire ainsi qu'un nombre de cellules (marginales et basales) anormalement faible donnant lieu à une strie vasculaire amincie, immature. À J21 les cellules marginales disparaissent et sont remplacées par des cellules basales. (1)

La membrane de Reissner, qui correspond au plafond du conduit cochléaire, s'effondre progressivement. L'effondrement est total à J14. (2)

Les cellules ciliées externes de l'organe de Corti, qui sont déjà moins nombreuses à la naissance chez le chien sourd, dégénèrent et disparaissent elles-aussi totalement vers J14. À J21 ce sont des cellules de soutien qui les remplacent. (2')

On n'observe pas une dégénérescence systématique des cellules ciliées internes, cependant, elles disparaissent après J28.

La membrane tectoriale apparaît parfois repliée et calcifiée (Hiraide et Paparella, 1988 ; Rouse et al., 1984 ; Johnsson et al., 1981). (3)

Après la première année de vie, le ganglion spiral commence à s'atrophier et ses cellules disparaissent. (4)

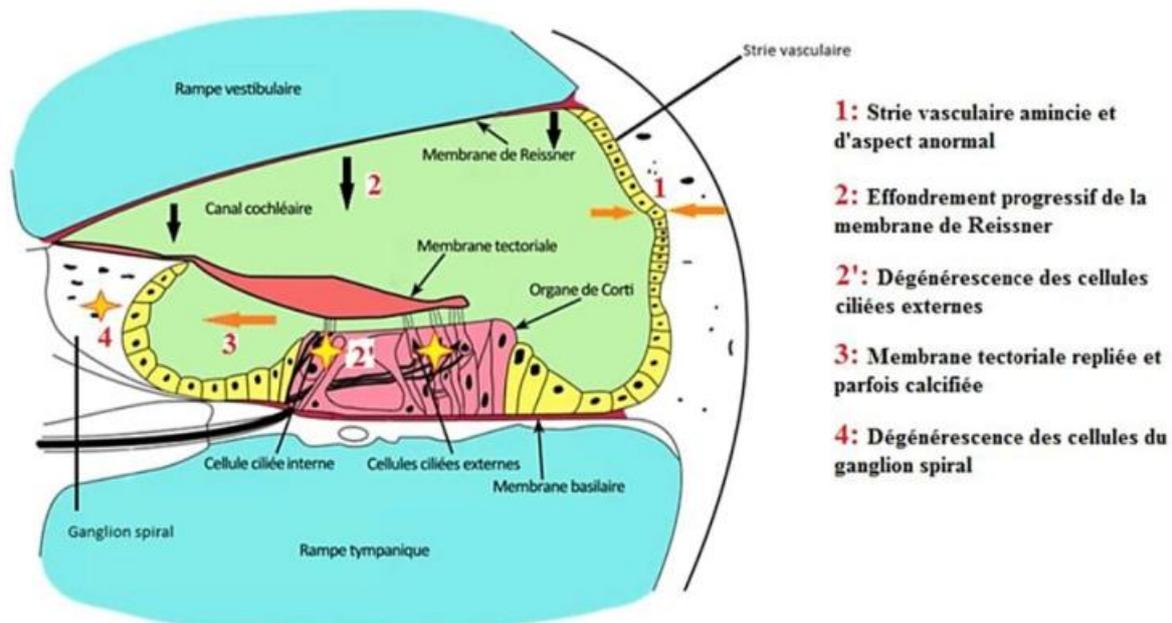


Figure 34 : Représentation schématique des lésions cochléaires lors de la dysplasie cochléo-sacculaire du Dalmatien (D'après Anderson et al., 1968 ; Gaudron, 2015)

Il est important de souligner que cette dysplasie est un phénomène évolutif, étroitement lié à l'âge du chiot. Plus ce dernier vieillit, plus il a de lésions et plus elles sont graves. On peut par ailleurs observer une différence de sévérité des lésions histologiques chez deux chiots du même âge, et de la même race. On remarque que les lésions histologiques se ressemblent et sont en partie commune mais qu'il y a aussi une part de variabilité (Mair, 1976 ; Niparko et Finger, 1997 ; Wilkes et Palmer, 1992 ; Steel et al., 1987).

Cette variabilité peut être plus ou moins marquée selon les races que l'on compare. Ainsi des études ont montré que chez des pointers et des dobermans sourds, les lésions histologiques concernent l'organe de Corti mais que la strie vasculaire est intacte, alors que chez le dalmatien la strie vasculaire est toujours atteinte (Wilkes et Palmer, 1992 ; Coppens et al., 2005 ; Gaudron, 2015).

On a aussi montré que les cellules ciliées internes étaient atteintes avant les cellules ciliées externes chez un rottweiler sourd congénital, alors que c'est le mécanisme inverse chez le dalmatien (Coppens et al., 2001 ; Gaudron, 2015). La surdité sensorielle congénitale semble alors avoir un déterminisme différent selon les races.

Chez le dalmatien sourd, ce sont toujours les anomalies de la strie vasculaire qui apparaissent en premier, entraînant ensuite la dégénérescence des autres structures.

On a observé que la mutation de certains gènes chez la souris entraîne des lésions de la strie vasculaire similaires à celles que l'on observe chez le dalmatien sourd, ainsi qu'une surdité profonde et des anomalies de pigmentation chez ces souris (Steel et al. 1987 ; Schrott et Spoendlin, 1987 ; Coppens et al., 2003 ; Gaudron, 2015). Le rapprochement est alors fait entre les anomalies de pigmentation et cette strie vasculaire non mature. Ce serait en fait une anomalie des mélanocytes de la strie vasculaire qui empêcherait son développement correct, et cette anomalie primaire de la strie vasculaire qui conduirait à la surdité congénitale des souris et par extrapolation à celle des dalmatiens (Steel et al., 1987 ; Sampaio et al., 2010).

L'anomalie des mélanocytes peut être du, soit à un défaut de migration depuis la crête neurale, soit à un problème de survie des mélanocytes, soit à un problème de différenciation (Strain, 1996).

3) Physiologie de l'oreille

a. De l'oreille externe vers le cortex auditif

La première étape de la perception auditive correspond à la transmission de l'onde sonore vers l'oreille interne. L'oreille interne permet ensuite la transduction du signal mécanique en un signal électrique qui sera transmis au cortex auditif. Le mécanisme est décrit ci-dessous (Gaudron, 2015) (Figure 35).

En effet, le son est une vibration de l'air, celle-ci est captée par le pavillon externe de l'oreille puis emprunte le conduit auditif externe jusqu'au tympan.

La membrane du tympan vibre alors au rythme de l'onde initiale et cela entraîne la mise en mouvement des osselets de l'oreille moyenne : le marteau entre en mouvement et entraîne avec lui l'enclume puis l'étrier, l'articulation entre les trois osselets permet l'amplification du signal.

L'étrier met alors en mouvement la fenêtre ovale ou fenêtre du vestibule qui se trouve au regard de la cochlée. On a là encore un phénomène d'amplification par le fait que la fenêtre ovale a une surface bien plus petite que la membrane du tympan.

La fenêtre ovale se déforme sous l'influence de l'étrier et transmet alors la vibration à l'intérieur de la cochlée en mettant en mouvement la périlymphe.

L'onde produite se propage jusqu'au sommet de la cochlée par la rampe vestibulaire puis redescend par la rampe tympanique jusqu'à la fenêtre ronde.

Sur son passage elle exerce une force sur le conduit cochléaire, qui met en mouvement l'endolymphe et fait ainsi vibrer la lame basale et donc l'organe de Corti. En fonction de la

fréquence du son émis, la vibration de la lame basale sera maximale en un point donné. C'est au niveau de ce point que la majorité de l'onde est transmise entre la rampe vestibulaire et la rampe tympanique.

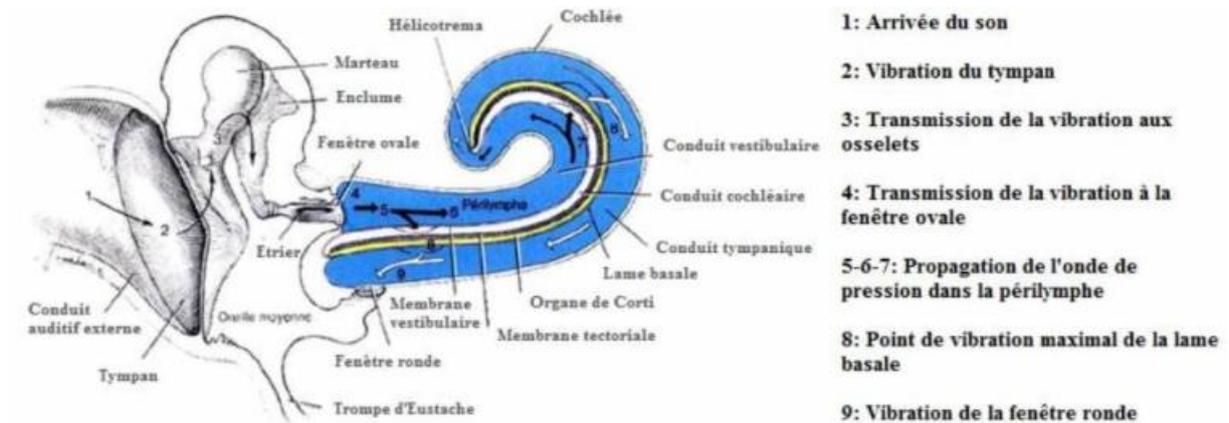


Figure 35 : Représentation schématique de la propagation de l'onde sonore (cochlée déroulée)
(Tortora et Derrickson, 2007)

Le fait que la lame basale vibre à des endroits différents en fonction de la fréquence du son émis est dû à sa conformation. En effet, sa largeur et sa rigidité varient sur toute sa longueur. Au niveau de la base de la cochlée, la lame basale est étroite et rigide et c'est le point de vibration pour les hautes fréquences, c'est-à-dire les sons aigus. Plus on va vers l'apex de la cochlée, plus la lame basale est large et souple, elle vibre à la réception des basses fréquences, c'est-à-dire des sons graves (Figure 36).

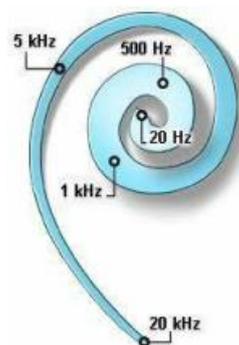


Figure 36 : Représentation schématique des variations de conformation de la lame basale et fréquence de vibration associées (chez l'Homme) (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

Ainsi, la lame basale représente la gamme de fréquence audible avec un point précis de vibration pour une fréquence donnée. La réception d'une fréquence stimule alors les cellules sensorielles et les neurones sensitifs correspondants, ce qui permet au cerveau de faire la

différence entre deux sons de hauteur différente. L'intensité du son, c'est-à-dire l'amplitude, est déterminée par la fréquence des potentiels d'action (Campbell et Reece, 2005 ; Tobias et Paterson, 2012 ; Gaudron, 2015).

C'est l'organe de Corti qui permet la transduction d'un signal jusqu'ici mécanique, en un signal électrique pouvant être transmis au cortex auditif, c'est-à-dire en train de potentiel d'action. Cela est permis grâce au potentiel endocochléaire, maintenu à +80 millivolts par la différence de composition ionique entre l'endolymphe et la périlymphe.

La composition ionique de l'endolymphe est proche de celle du liquide intracellulaire, c'est-à-dire riche en potassium (K^+), et celle de la périlymphe est proche de celle du liquide extracellulaire, c'est-à-dire riche en sodium (Na^+) (Figure 37). Le potentiel des cellules ciliées est intermédiaire puisque leur pôle apical est au contact de l'endolymphe alors que leur pôle basal est au contact de la périlymphe (Jin et al., 2009).

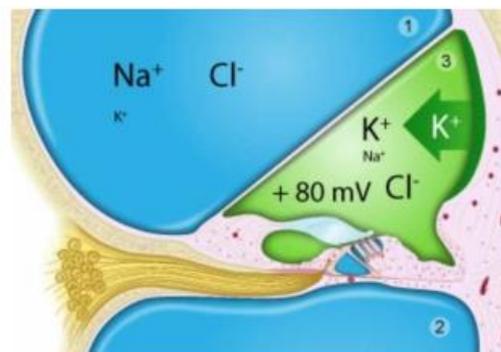


Figure 37 : Représentation schématique du potentiel endocochléaire (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

Lors de la réception d'une onde sonore, la vibration de la lame basale entraîne une cascade de réaction au niveau de l'organe de Corti. Le mécanisme de transduction est décrit ci-dessous (Gaudron ; 2015) (Figure 38) :

- L'onde met en mouvement les cils des cellules ciliées, soit directement, soit via le mouvement de la membrane tectoriale qui les coiffe. **1**
- Ce mouvement permet l'ouverture de canaux potassium mécano-dépendants, et ainsi une entrée de potassium dans la cellule. **2**
- L'entrée de potassium détermine une dépolarisation qui permet l'ouverture de canaux calcium (Ca_{2+}), et donc l'entrée de calcium dans la cellule. **3**
- Le calcium présent dans la cellule permet sa dépolarisation et l'exocytose de vésicules de neurotransmetteur au pôle apical, au niveau des fibres afférentes. La réception du neurotransmetteur au niveau de ces fibres entraîne la genèse d'un potentiel d'action qui est alors transmis au cortex auditif. **4**

- Le calcium amorce ensuite la phase de repolarisation en entraînant l'ouverture de canaux potassium du côté basal de la cellule et donc la sortie de potassium vers la périlymphe. 5
- La sortie du calcium via des pompes à calcium notamment permet le retour à un potentiel cellulaire normal. L'ouverture de canaux potassium « potentiel dépendants » ainsi que le redressement des cils participent également à cette repolarisation. 6-7

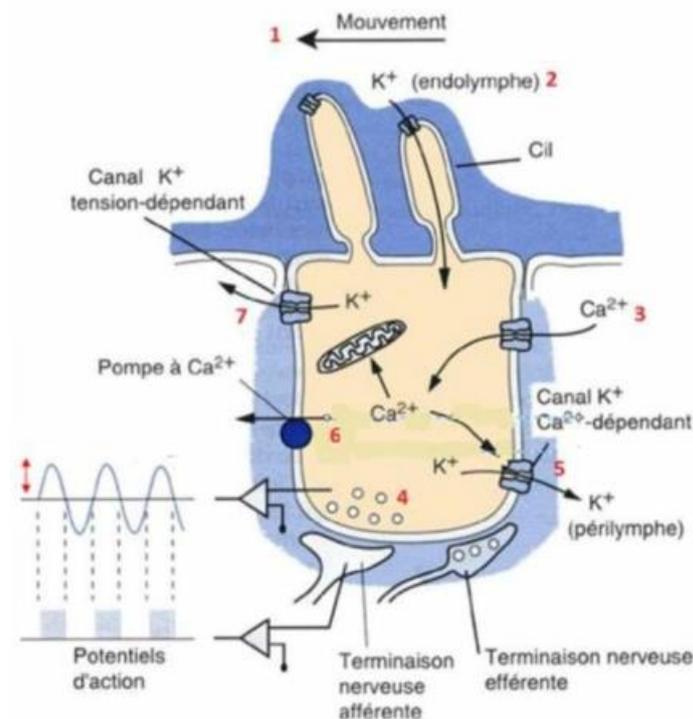


Figure 38 : Représentation schématique de la transduction du signal sonore au niveau d'une cellule ciliée (Gaudron, 2015)

Le signal électrique ainsi créé au niveau des fibres afférentes de la cochlée est ensuite conduit vers les noyaux auditifs du tronc cérébral. On observe deux faisceaux distincts, le faisceau radial qui conduit l'information en provenance des cellules ciliées internes, et le faisceau spiral qui conduit l'information en provenance des cellules ciliées externes.

Il y a également deux faisceaux de fibres efférentes. Pour les cellules ciliées internes ces fibres efférentes proviennent de l'olive supérieure ipsilatérale (Figure 39), tandis que pour les cellules ciliées externes elles proviennent bilatéralement du complexe olivaire supérieur médian (Figure 40).

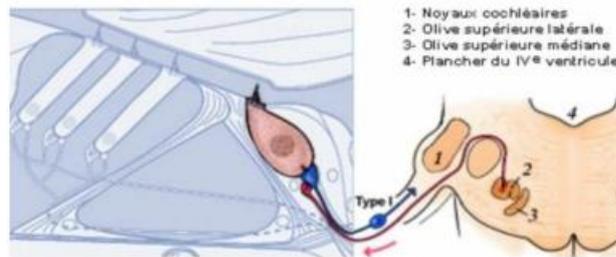


Figure 39 : Représentation schématique de l'innervation des cellules ciliées internes (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

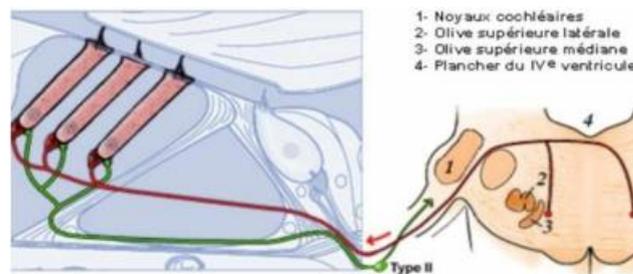


Figure 40 : Représentation schématique de l'innervation des cellules ciliées externes (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

Il est important ici de préciser que les cellules ciliées internes et les cellules ciliées externes ne jouent pas le même rôle. En effet, les cellules ciliées internes vont servir à coder le stimulus sonore pour ensuite le transmettre au cerveau alors que les cellules ciliées externes, dont les cils sont fichés dans la membrane tectoriale vont jouer un rôle dans l'amplification et la sélectivité en fréquence de la vibration de l'organe de Corti. Ce sont les propriétés de la paroi des cellules ciliées externe qui leur permettent de changer de taille rapidement afin de moduler les vibrations de l'Organe de Corti. On parle d'électromotilité. On retrouve ces cellules uniquement chez les Mammifères (Legendre et al., 2009).

Avant d'atteindre le cortex cérébral, l'information auditive passe par quatre relais dont les noyaux cochléaires, le complexe olivaire et le thalamus (Figure 41).

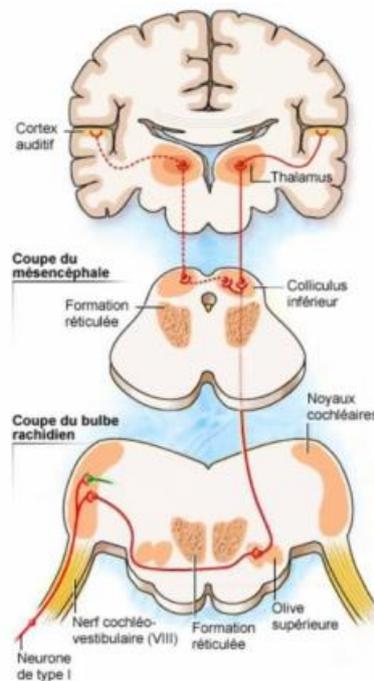
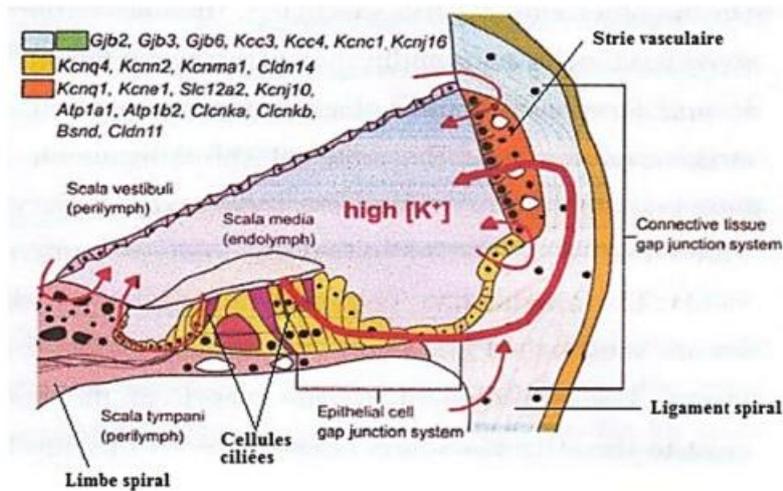


Figure 41 : Représentation schématique des voies centripètes de l'information sonore (chez l'Homme) (Crédit Image : cochlea.eu [Internet])

Enfin, il est important de noter le rôle primordial de la strie vasculaire dans le maintien de la concentration élevée de potassium dans l'endolymphe. En effet, lorsque le potassium est libéré par les cellules ciliées il est pris en charge par de nombreux canaux. La majeure partie est d'abord transportée latéralement via des jonctions communicantes entre les cellules puis remonte jusqu'à la strie vasculaire (Figure 42). Des transporteurs spécifiques permettent alors son recyclage et son relargage dans l'endolymphe du conduit cochléaire (Sampaio et al., 2010 ; Gaudron, 2015).



Les couleurs de la légende indiquent les noms des différents gènes codant les canaux ioniques impliqués.

Figure 42 : Représentation schématique du recyclage du potassium par la strie vasculaire (Niparko et Finger, 1997)

b. Physiopathologie de la surdité du dalmatien

On a vu précédemment lors de l'analyse des lésions histologiques que la strie vasculaire dégénère chez les dalmatiens atteints de surdité neurosensorielle. Cette dégénérescence aboutit à une perte du potentiel endocochléaire car la composition ionique de l'endolymphe ne peut être maintenue sans une strie vasculaire fonctionnelle. Sans potentiel endocochléaire, il n'y a pas d'entrée de potassium par les canaux mécano-dépendants et donc l'audition n'est plus possible.

En effet, c'est la strie vasculaire qui assure le maintien du gradient entre l'endolymphe et la périlymphe, lui-même indispensable pour le transport passif de potassium entre l'endolymphe et la cellule ciliée quand les canaux mécano-dépendants s'ouvrent (Jin et al., 2009 ; Takeuchi et al., 2000 ; Gaudron, 2015). En fait, ce sont les nombreux canaux et transporteurs de la strie vasculaire qui permettent le recyclage et la sécrétion d'ions potassium dans l'endolymphe, et ainsi le fonctionnement des cellules ciliées (Figure 43).

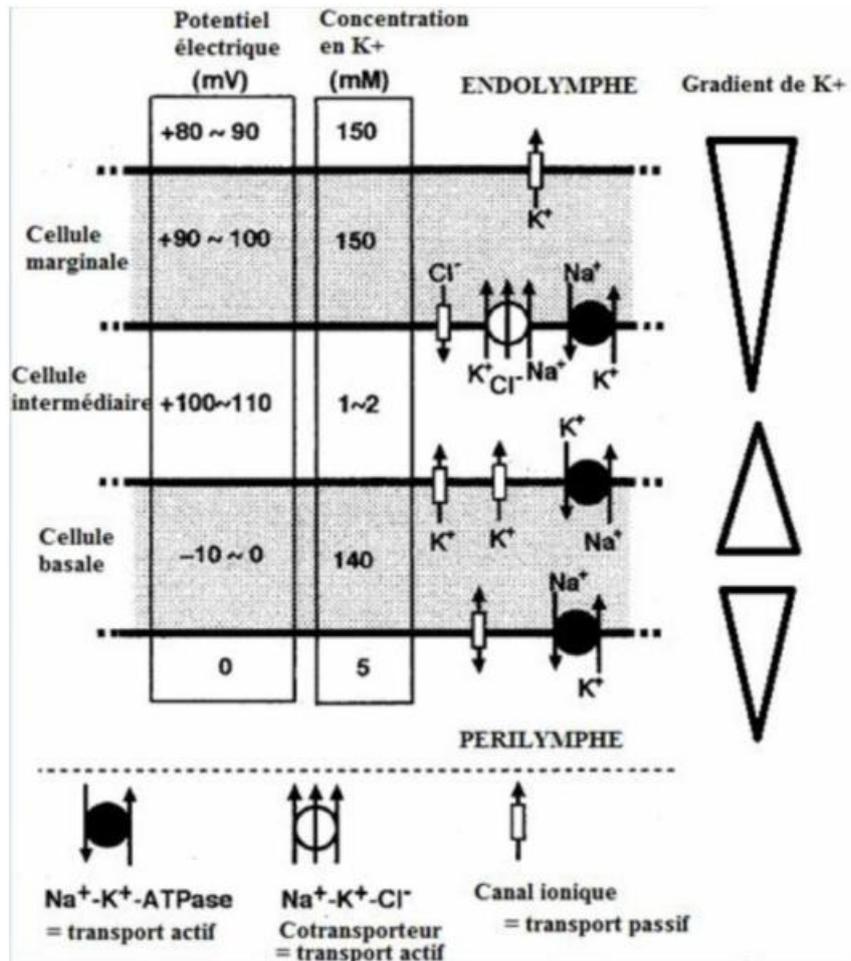


Figure 43 : Représentation schématique des différents transporteurs ioniques de la strie vasculaires impliqués dans le maintien du potentiel endocochléaire (Takeuchi et al., 2000)

Les mélanocytes étant nécessaires au maintien et au bon fonctionnement de la strie vasculaire, leur absence ou leur dysfonctionnement pourraient expliquer sa dégénérescence et la surdité qui s'en suit. Ainsi chez des souris mutantes ne possédant pas de mélanocytes, on note une absence de potentiel endolymphatique (ainsi que des cellules marginales immatures) (Steel et al., 1987 ; Gaudron, 2015).

Cependant, le maintien du potentiel endocochléaire dépend de beaucoup d'autres cellules et d'autres mécanismes. Toute mutation entraînant une rupture de cet équilibre pourrait donc avoir les mêmes conséquences et les mélanocytes ne sont pas les seuls à pouvoir être mis en cause.

En revanche, le pigment produit par les mélanocytes, c'est-à-dire la mélanine, ne semble pas avoir de rôle dans le maintien du potentiel endolymphatique. En effet, les animaux albinos sont capables de maintenir un potentiel endolymphatique alors que leurs mélanocytes ne

produisent pas de mélanine. Le potentiel diminuera tout de même plus vite avec l'âge chez les animaux albinos. On explique cela car la mélanine jouerait un rôle protecteur de la cellule contre l'endommagement de son ADN. Ainsi, un mélanocyte qui produit de la mélanine vivra plus longtemps, et assurera donc sa fonction plus longtemps (Price et Fisher, 2001 ; Gottesberge, 1988 ; Bush et Simon, 2007 ; Gaudron, 2015).

Dans tous les cas, s'il y a une anomalie dans la migration, la maturation ou la survie des mélanocytes de la strie vasculaire, alors la strie vasculaire dégénère et le potentiel endocochléaire disparaît, la fonction auditive ne peut alors pas être maintenue. L'hypothèse principale de la surdité neurosensorielle des races à robe blanche consiste donc en une anomalie des mélanocytes qui serait la cause primaire de toutes les autres lésions observées. Par ailleurs, on ne peut pas ignorer que toute autre anomalie qui serait délétère pour le maintien du potentiel endocochléaire provoquerait la même surdité neurosensorielle.

4) Le diagnostic de certitude : les Potentiels Evoqués Auditifs

La surdité du dalmatien est une surdité congénitale neurosensorielle. C'est un défaut de l'oreille interne qui est transmissible. La détérioration est progressive jusqu'à quatre semaines environ et commence dès le premier jour de vie.

La transmissibilité de l'affection nous renseigne sur son aspect génétique mais l'étiologie exacte n'est pas connue (Strain, 1996).

Avant 15 jours, tous les chiots sont sourds puisque leur conduit auditif externe est fermé. Il ne s'ouvre en effet qu'autour du 14^{ème} jour après la naissance et c'est à ce moment-là que l'on va donc pouvoir définir le statut auditif du chiot.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de supposer la surdité d'un chiot dans une portée. Les éleveurs rapportent un comportement anormal avec un chiot qui passe plus de temps à dormir, reste à l'écart, ne répond pas aux vocalises des autres ni aux nouveaux bruits de son environnement. Le test au sifflet peut être un bon indicateur, un chiot entendant cherchera à identifier la source sonore, par un mouvement d'oreille et/ou une recherche visuelle. Le test dit de sursaut est lui aussi un bon indicateur. En effet, émettre un son bref et fort au dessus de la tête d'un chiot endormi est censé le faire sursauter si celui-ci est entendant (Cox, 2002 ; Gaudron, 2015).

Cependant, même s'il est facile de détecter un chiot sourd bilatéral par ces méthodes rapides et artisanales, la détection d'un chiot sourd unilatéral est bien plus complexe car ce dernier compense avec son oreille entendante. On fait alors appel au seul moyen d'avoir un diagnostic de certitude : les potentiels évoqués auditifs précoces (PEAp).

Les PEAp sont la méthode officielle utilisée pour détecter les surdités congénitales. Cela correspond à l'enregistrement de l'activité électrique de la cochlée et des premières voies nerveuses auditives en réponse à une stimulation sonore. Le principe est semblable à celui de l'électrocardiogramme si ce n'est que le cœur a une activité spontanée qui ne nécessite pas de stimulation pour être enregistrée (Sims et Moore , 1984 ; August et Sims, 1988 ; Strain et al., 1992 ; Gaudron, 2015).

Cette méthode est l'une des seules à être fiable pour la détection des individus sourds unilatéraux et leur dépistage est important pour pouvoir les écarter de la reproduction. On ne peut malheureusement pas dépister les porteurs sains car les tests génétiques ne sont pas encore au point à l'heure actuelle.

a. Matériel et méthode

(Poncelet et al., 2002 ; Shelton et al., 1993 ; Shiu et al., 1997 ; Steiss, 1988 ; Gaudron, 2015)

- Les électrodes : au nombre de trois, une exploratrice ou négative, une de référence ou positive et une pour la masse. Ce sont généralement de petites électrodes aiguilles de scalp ou encore des petites pinces crocodiles.
L'électrode positive est placée au sommet du crâne et reliée sur l'entrée non inverseuse du préamplificateur.
L'électrode négative est placée au niveau du processus mastoïde de l'oreille à tester et reliée sur l'entrée inverseuse du préamplificateur (Figure 44). On change donc cette électrode de côté pour tester la deuxième oreille (sauf dans le cas d'appareils possédant plusieurs bornes d'entrées).
La masse est placée en un point quelconque, généralement entre les scapulas, au niveau de la ligne du dos.



Figure 44 : Chiot Dalmatien durant un dépistage PEAp (Gaudron, 2015)

- L'amplificateur permet d'amplifier la réponse enregistrée d'un facteur 100 000 à 500 000. En effet, la réponse initiale du système nerveux est de l'ordre du microvolt (Kay et al., 1984).
- Le moyeneur joue un rôle clé. À cause du bruit de fond électrique, c'est-à-dire principalement de l'activité électrique de l'encéphale, on va réaliser un grand nombre d'enregistrement (environ 1 000) et demander au moyeneur une moyenne de ces 1 000 enregistrements. Comme le bruit de fond est aléatoire, la moyenne des amplitudes des ondes recueillies tend vers zéro et on obtient une ligne plate, ce qui supprime virtuellement le bruit de fond. La réponse électrique auditive est quant à elle toujours la même, elle est donc mise en évidence par ce processus de moyennage.
- Le casque ou l'écouteur pour générer le stimulus sonore.
- L'écouteur dit de masquage ou « masking », pour que l'oreille non testée ne vienne pas parasiter l'enregistrement.

En effet, le son envoyé dans l'oreille testée peut être transmis à l'oreille non testée par conduction osseuse. L'écouteur de masquage produit un bruit blanc continu qui contient toutes les fréquences (émises aléatoirement avec la même énergie), ainsi l'oreille non testée ne génère aucune réponse électrophysiologique significative, ce qui évite de perturber la réponse de l'oreille explorée (Van Der Velden et Rijkse, 1984 ; Goncalves et al., 2008 ; Gaudron, 2015).

- Le stimulateur permet de définir l'intensité et la fréquence de la stimulation sonore mais également sa nature et sa polarité.
- Ici, on exprime la fréquence en clic par seconde car la machine ne produit pas un son continu et la fréquence de ces clics varie entre 10 et 70 Hertz. La fréquence n'a pas réellement d'importance car la surdité suit la loi du tout ou rien et ne sera pas spécifique d'une fréquence. Cependant, on explore toujours l'audition dans des gammes de fréquences mediums/aigues (2-4 kilohertz pour le clic).
Il est possible de faire varier l'intensité (en décibel) mais en principe on utilise juste une intensité suffisante, autour de 90 décibels, pour écarter le doute d'une éventuelle hypoacousie, c'est-à-dire une simple perte de sensibilité auditive.
La polarité correspond en fait au sens de déformation du tympan à la suite de la première déflexion de l'onde acoustique produite par le haut parleur. Soit le tympan s'éloigne de la source sonore, c'est un clic de condensation. Soit le tympan se rapproche de la source sonore, c'est un clic de raréfaction. En pratique, on alterne les deux types de clics pour gommer les artéfacts.
Pour la nature du signal, il en existe deux types. La voie aérienne quand le signal sonore passe par l'air, c'est le cas avec un écouteur et c'est la méthode classique de dépistage. Mais quand on suspecte une surdité de conduction, on utilise les os du crâne pour propager l'onde sonore, c'est la voie osseuse. Elle nécessite un équipement plus complexe (vibrateur osseux) mais elle permet de vérifier le fonctionnement de l'oreille interne indépendamment de l'oreille externe et moyenne (Strain et al., 1992 ; Lefebvre, 1993).

b. Déroulement

Les mouvements de l'animal pendant l'enregistrement risqueraient de parasiter le tracé (activités électriques liées aux contractions musculaires). Ainsi, si l'animal ne bouge pas il n'est pas nécessaire de l'anesthésier mais en pratique l'anesthésie des chiots est souvent pratiquée et facilite la manœuvre.

La plupart des anesthésiques et tranquillisants n'ont pas d'effet sur la fonction auditive, ou en tout cas n'impactent pas la qualité des tracés obtenus, à l'exception du thiamylal sodique (plus commercialisé à l'heure actuelle) qu'il est donc déconseillé d'utiliser (Tokuriki et al., 1990 ; August et Sims, 1988 ; Myers et al., 1985 ; Kemper et al., 2013 ; Cauzinille, 1997 ; Gaudron, 2015).

Après cette étape, on place les électrodes et on envoie la stimulation sonore grâce au casque ou à l'écouteur préalablement mis en place sur l'oreille testée. On enregistre la réponse auditive électrique associée sur une fenêtre de 10 millisecondes, avec moyennage d'environ

1 000 à 2 000 stimulations ; celle-ci s'affiche sur l'écran de l'appareil sous la forme d'une courbe avec plusieurs pics ou déflexions. On change ensuite d'oreille de manière à avoir une courbe par oreille.

c. Interprétation

(Cauzinille, 1997 ; Goncalves et al., 2012 ; Holliday et Te Selle, 1985 ; Kawasaki et Inada, 1994 ; Gaudron, 2015) (Figure 45)

On identifie les déflexions et pics obtenus par des chiffres romains. On peut aussi déterminer leur amplitude et leur latence. La latence correspond au temps entre la stimulation auditive et l'onde obtenue, exprimé en millisecondes, mais également le temps écoulé entre les différentes ondes. L'amplitude, exprimée en microvolts, se mesure du point le plus haut de l'onde au point le plus bas de la déflexion.

Bien que la correspondance absolue entre ondes identifiées et structures anatomiques soit encore discutée, les postulats suivants sont communément admis :

La première onde positive correspond à l'onde I, c'est généralement la plus grande. Elle représente l'activité de la cochlée et du nerf cochléaire proximal.

L'onde II représente l'activité du nerf cochléaire dans sa portion terminale et du noyau cochléaire ipsilatéral.

L'onde III représente l'activité du noyau dorsal du ou des corps trapézoïdes ainsi que celle du complexe olivaire supérieur.

L'onde IV, très variable, peut être fusionnée à l'onde III ou encore à l'onde V. C'est l'activité du noyau du lemnisque latéral.

L'onde V représente l'activité du colliculus inférieur. Elle est suivie d'une forte déflexion.

L'onde VI et VII représentent respectivement l'activité des corps géniculés médiaux du thalamus et du cortex auditif. Leur présence n'est pas systématique.

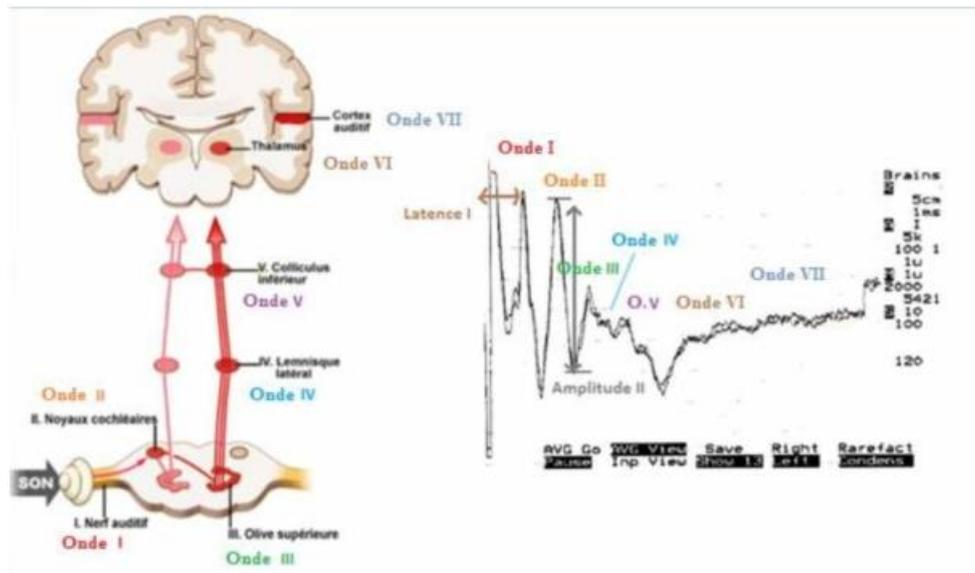


Figure 46 : Lien entre le trajet nerveux auditif et le tracé PEA (Tortora et Derrickson, 2007)

Comme dit précédemment, la surdité congénitale neurosensorielle obéit à la loi du tout ou rien. Ainsi, toutes les ondes disparaissent chez un sujet atteint, on parle alors de tracé isoélectrique (Figure 46).

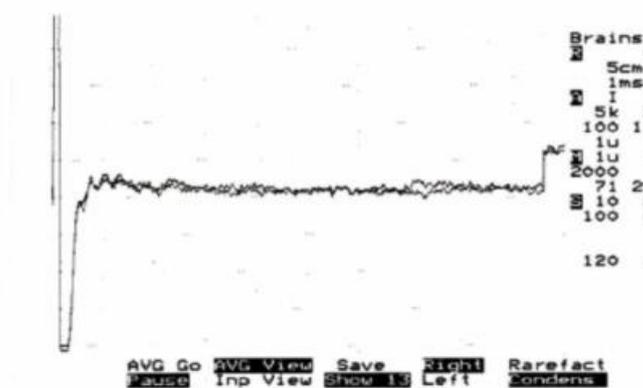


Figure 45 : Tracé PEA isoélectrique (Gaudron, 2015)

Chez le très jeune chiot, les tracés obtenus ne sont pas encore définitifs, on observe notamment des temps de latences plus longs que chez l'adulte. Ce n'est que vers six semaines d'âge que les tracés seront semblables à ceux de l'adulte, il est donc conseillé de faire le test de dépistage à partir de six semaines (Poncelet et al., 2002 ; Gaudron, 2015).

Lors d'une surdité de transmission on obtient un tracé douteux, qui ne suit pas la loi du tout ou rien mais qui ressemble plutôt à un tracé normal atténué en amplitude, avec des latences

d'ondes augmentées. On utilise alors une stimulation osseuse, et en cas de surdité de transmission, le tracé obtenu sera alors normal.

On obtient également des tracés atypiques et parfois délicats à interpréter en cas de surdité unilatérale quand la réponse de l'oreille controlatérale saine vient parasiter l'enregistrement. Dans ce cas-là, on utilise l'écouteur de masquage sur l'oreille saine pour obtenir un tracé isoélectrique de l'oreille sourde.

B. La formation du chien au travail olfactif : exemple du chien de recherche de matières

Ayant eu la chance de faire des stages auprès d'équipes cynotechniques et de formateurs, certaines informations de cette partie sont tirées de mon expérience personnelle.

Comme vu précédemment, il existe de nombreuses tâches d'identification olfactive différentes utilisées en cynotechnie, qui résultent d'une multitude de formations différentes. Dans notre étude, le travail que l'on demandera par la suite à nos chiens s'apparente au travail de recherche de matières utilisé par les brigades de sécurité et de défense (Pompiers, Sécurité Civile, Gendarmerie, Police, Armée ...). C'est donc cette méthode de formation qui sera exposée dans cette partie.

En général, les chiens spécialisés dans cette technique sont utilisés pour la recherche de stupéfiants, d'explosifs, de billets et d'odeurs humaines. Leur méthode de formation est similaire et certains chiens peuvent avoir une double fonction. (Jacquet, 2003).

Comme évoqué dans la partie II. D. 1) b. et c., le chien dispose de qualités olfactives variables en fonction de sa race, du fait d'une morphologie plus ou moins favorable au système olfactif. Mais c'est aussi et surtout son caractère et ses capacités d'apprentissage et de mémorisation qui en feront un bon candidat pour être un chien de travail efficace.

Pour rappel, les chiens m soc phales sont morphologiquement les plus adaptés à la performance olfactive.

Pour le caractère, on cherchera un chien joueur ou à défaut gourmand, car l'intérêt pour la récompense est primordial dans le processus de formation, mais également intrépide et équilibré car un chien peureux ne pourra pas faire face au stress que lui procure un environnement nouveau.

Jusqu'à présent, les brigades cynotechniques de la Gendarmerie étaient essentiellement composées par des Bergers Allemands ou des Bergers Belges Malinois pour leur gabarit, leur polyvalence, leur facilité d'apprentissage et leur capacité d'adaptation. Aujourd'hui, même si

le Malinois reste majoritaire, les brigades de recherche cynotechniques peuvent être composées d'animaux plus monovalents. C'est ainsi que l'on peut par exemple voir des Labradors ou encore un Drahthaar parmi les chiens d'avalanches.

Par monovalent, on entend que la rusticité et l'instinct de chasse du Drahthaar en font un redoutable chien d'avalanche, mais le rendront sûrement moins efficace qu'un Malinois pour des contrôles à l'aéroport. Alors que le Malinois et le Berger Allemand vont plus facilement exceller dans toute la gamme de tâches qui leur sera demandée.

1) L'acquisition de la faculté de recherche

Au cours de la formation des brigades cynotechniques, c'est durant la phase dite de débouillage (Figure 50) que les chiens acquièrent leur aptitude à la recherche d'objet, puis d'odeur. Cette phase dure environ trois mois et suit directement la phase de recrutement. Les chiens sont alors jeunes, les plus vieux ont deux ou trois ans tandis que les plus jeunes ont autour de 10 mois.

Les chiens sélectionnés pour la recherche de matières sont des chiens joueurs et explorateurs. Leur formation à la recherche est basée sur le jeu car c'est le moyen de motivation le plus fort et le plus pérenne pour faire travailler un chien (Jacquet, 2003).

a. Fanatisation

La première étape dans le processus de débouillage est le jeu. L'objectif va être de focaliser l'attention du chien sur un objet de manière ludique. Pour la recherche de stupéfiants cet objet est un tube creux en plastique rigide, percé de petits trous (Figure 47).



Figure 47 : Exemple de jouets utilisés pour la fanatisation (D'après Jacquet, 2003)

En pratique, le jeu consiste à lancer l'objet au chien. Quand il le rapporte, la méthode pour que l'intérêt du chien envers cet objet augmente consiste à essayer de lui prendre mais tout en le laissant repartir avec. De cette manière le chien « gagne » la confrontation et se sent fort avec cet objet. Au début on fait cela sur un terrain sans obstacle, en prévenant le chien à chaque fois et en introduisant l'ordre « cherche ». Puis on peut peu à peu faire la même chose sur un terrain où les obstacles peuvent masquer temporairement l'objet, ou encore lancer le jouet sans prévenir le chien.

Une fois que le chien porte un très fort intérêt pour l'objet, on dit qu'il est « fanatisé » et on peut passer à l'étape suivante.

b. Créancement

Le tube est dévissable à ses deux extrémités, de manière à pouvoir y introduire une matière odorante. L'odeur diffusera alors par les petits trous qui sont percés sur la longueur du tube et la résistance du plastique rigide empêchera le chien de pouvoir ingérer la matière (Figure 48).



Figure 48 : Extrémité démontable du jouet (Jacquet, 2003)

La deuxième étape consiste à faire mémoriser au chien l'odeur de la matière cible. Pour les chiens de recherche en stupéfiants, la première matière cible est la résine de cannabis car c'est le stupéfiant qui dégage l'odeur la plus forte, et qui est donc le plus facile à mémoriser. Pour cela, on insère de petites quantités de résine de cannabis dans le tube, puis on joue avec le chien exactement de la même manière que pour la première étape. Ainsi le chien associe l'odeur de la matière cible à son jouet. Lorsque le chien a mémorisé l'odeur, on dit que le chien est « créancé » et on peut alors commencer à utiliser l'odorat de l'animal pour le faire travailler. C'est la 3^{ème} étape.

c. Simulacre de poses

Cette 3^{ème} étape consiste à faire chercher au chien le tube après l'avoir caché quelque part dans une pièce ou dehors. En fait, le maître va, dans l'environnement choisi, faire semblant de déposer le tube à plusieurs endroits tout en haranguant son chien pour attirer son attention. On appelle cette manœuvre le « simulacre de poses ».

Pendant ce temps, une personne tierce tient le chien à l'entrée de la pièce ou du parc par exemple. Le maître revient face au chien, lui montre ses mains vides et lui ordonne de chercher l'objet. On lâche alors l'animal qui part à la recherche de son jouet, que le maître a caché dans l'un des endroits précédents. D'abord visuelle, sa recherche est ensuite basée sur son odorat.

Pendant la recherche, quand le chien est proche du jouet, il sollicite en général l'attention de son maître, par un regard, un aboiement ou un mouvement de queue par exemple. On appelle ce moment la « fixation ». Le chien a identifié l'odeur mais sans avoir encore trouvé l'objet. Il est primordial que le maître identifie ce signal pour encourager l'animal à approfondir sa recherche. Pour cela, un encouragement oral accompagné d'une caresse suffit. Le chien doit quant à lui apprendre que cet encouragement lui indique qu'il doit affiner sa recherche et indiquer de manière précise la source de l'odeur.

Le chien finit alors par trouver son jouet et est récompensé par une séance de jeu avec ce dernier.

Par cette étape du simulacre de poses, le chien comprend que l'ordre « cherche » lui indique qu'il doit trouver son jouet en utilisant son odorat. L'ordre « cherche » revient donc pour lui à identifier la source de l'odeur de cannabis, émanant de son jouet ou d'un autre substrat. Il suffira juste de le récompenser avec son jouet quand il trouve pour que sa motivation à chercher cette odeur reste intacte. A ce moment, le chien a donc acquis la capacité à chercher l'odeur cible dans un environnement donné.

d. Marquage

La phase suivante consiste à apprendre au chien à indiquer clairement à son maître qu'il a trouvé la source de cette odeur. On appelle cette phase le « marquage ». Certains chiens vont par exemple aboyer spontanément au moment où ils trouvent la cible mais ils ne le font pas tous et dans la plupart des brigades cynotechniques, on apprend au chien à gratter à l'endroit où il identifie la source odorante.

Pour cet apprentissage, on place dans du sable un tuyau grillagé dans lequel on enferme le jouet du chien. Le tuyau est en fait enfoui dans le sable mais on laisse la partie grillagée visible.

Ainsi quand le chien localise son jouet, il le voit à travers la partie grillagée mais il ne peut pas le saisir. La frustration générée, couplée au comportement de son maître qui gratte le sol de manière à lui montrer l'exemple, entraîne le chien à gratter autour du tuyau. Quand le maître estime que son chien a suffisamment gratté, il le récompense en lui donnant le jouet.

Afin d'obtenir un autre type de réponse conditionnée, on peut utiliser une planche à renforcement (Figure 49).



Figure 49 : Planche à renforcement (Jacquet, 2003)

Cet appareil est représenté par un caisson en bois avec des renforcements qui seront utilisés comme cachettes. On place la source odorante cible (qui peut être le jouet) dans un des renforcements puis on les ferme tous avec des morceaux de cartons ajourés. Le chien localise la source odorante mais ne la voit pas, sa frustration le pousse à gratter jusqu'à arracher le carton avant d'être récompensé.

Finalement, pendant les trois mois de déboufrage le chien acquiert la capacité à rechercher une source odorante cible et à indiquer sa localisation à son maître par le marquage. Tout au long de cette période, on augmente la difficulté pour le chien. On commence par des cachettes faciles, avec l'objet odorisé placé au sol. Ensuite, la source est placée en hauteur. Ainsi, le chien apprend à ne pas limiter sa recherche. On peut également placer la source sur différentes surfaces pour que le chien apprenne à gratter quel que soit le type de surface. À la fin de la période d'apprentissage, on peut même entraîner le chien à rechercher deux objets au lieu d'un, on parle alors de « relance ».

Dans tous les cas, durant cette phase, chaque recherche se fait à la suite d'un simulacre de poses.

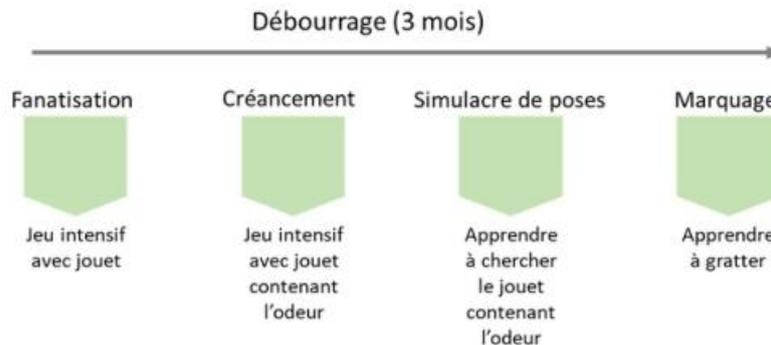


Figure 50 : Résumé de la phase de déboufrage d'un chien de gendarmerie dans l'apprentissage de la recherche de stupéfiants (Crédit Image : CHALARD Clément)

2) Progression et difficultés

Après les trois mois de déboufrage, une nouvelle phase commence : c'est la phase de formation, qui dure trois mois également (Figure 51).

a. Cache à l'insu

Durant cette phase, on supprime le simulacre de poses car le chien a compris ce qu'on attend de lui, on cache donc l'objet sans le lui montrer. Puis, avant de lâcher l'animal et de lui ordonner de chercher, une personne tierce lui montre son jouet, l'encourage et disparaît. Le chien est alors libre de se mouvoir dans l'espace qui l'entoure, sans indice. Le maître doit être vigilant quant à l'attitude de son chien car lui-même ne sait pas où se trouve l'objet odorisé.

b. Substitution

C'est aussi durant cette phase de formation que l'on va peu à peu remplacer le jouet contenant de la matière, par de la matière pure. C'est une étape clé puisque le chien va chercher la source odorante pour y trouver son jouet, or, dorénavant ce n'est plus son jouet qui émet l'odeur. On appelle cette étape la « substitution ». Il faut alors réussir à donner discrètement son jouet au chien au moment où il trouve la matière pure. Pour cela, le maître va le faire tomber discrètement de sa sacoche pendant que le chien gratte, afin que le chien continue d'associer la matière pure à son jouet. En effet, s'il commence à associer son jouet à son maître alors il n'aura plus de motivation à chercher la matière pure et préférera demander

le jouet directement à son maître. Il est très important d'attendre que le chien gratte vraiment pour le récompenser, ainsi on conserve sa motivation.

Peu à peu, on augmente la difficulté en diminuant la quantité de matière ou en choisissant des environnements plus complexes avec de nombreuses cachettes. Au bout d'un mois et demi, on peut créer le chien sur d'autres odeurs de drogue : héroïne, cocaïne, herbes ... La création à de nouvelles odeurs prend deux à trois jours et il est très important de continuer à faire travailler le chien sur chacune des odeurs qu'il connaît.

Enfin, à la fin de la phase de formation on peut introduire des odeurs distrayantes comme des odeurs de nourriture ou des odeurs fortes pour que le chien apprenne progressivement à ne pas être attentif à d'autres odeurs d'intérêt lors de sa quête. Sur le terrain, il revient aussi au maître d'analyser son environnement et d'y supprimer les sources d'odeurs parasites.

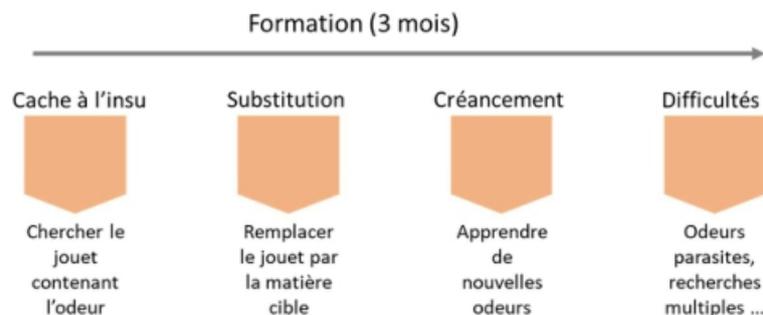


Figure 51 : Résumé de la phase de formation d'un chien de gendarmerie dans l'apprentissage de la recherche de stupéfiants (Crédit Image : CHALARD Clément)

3) Contrôle et maintien de l'apprentissage

Pour maintenir l'apprentissage une fois la formation terminée, la consigne donnée à chaque binôme « maître-chien » est de s'entraîner au moins une fois par semaine et en utilisant toutes les odeurs apprises. À cela se rajoutent évidemment les opérations de terrain. L'efficacité du chien ne pourra effectivement pas être maintenue sans entraînement.

Au sein du centre de formation, il existe une cellule de contrôle dont le rôle est de s'assurer que les chiens déployés sur le terrain sont efficaces. Pour cela, elle étudie les performances des chiens décrites dans les comptes rendus suivant chaque intervention et se déplace au sein des unités au minimum une fois par an. Quand l'efficacité d'un binôme est jugée en baisse, ce

dernier doit alors suivre un stage de recyclage dans le centre de formation. Il y a deux stages de recyclage par an et leur durée est de un mois.

C. Hypothèse de travail

1) Plasticité cérébrale

(Vidal, 2012)

Les progrès de la médecine et de l'imagerie, notamment dans le domaine des neurosciences, nous permettent de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau lors de son développement et lors des processus d'apprentissage. Par exemple, la mise au point de la technique d'imagerie à résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a révolutionné la compréhension du cerveau car elle permet d'observer l'activité du cerveau in vivo chez un individu qui effectue une tâche donnée.

C'est ainsi que l'exceptionnelle capacité du cerveau à s'adapter aux événements de la vie a été découverte. On sait dorénavant que la structure même du cerveau se modifie sous l'influence des expériences et des apprentissages : c'est la plasticité cérébrale.

Le cerveau n'est effectivement pas une structure fixe. C'est un organe dynamique qui se façonne en fonction de nos vies, et ce, peu importe notre âge, même si la neurogénèse est maximale avant la naissance et diminue ensuite.

Ce n'est donc pas uniquement en créant de nouveaux neurones que le cerveau s'adapte, mais également par la création et la modification des synapses entre les neurones. Ainsi chez le chaton, on passe de 100 synapses par neurone à J10, à plus de 12 000 à J30 après la naissance. Dans le cerveau humain on estime le nombre de synapses total à un million de milliard, or, seulement quelques milliers de gènes sont responsables de la construction du cerveau, les connexions neuronales ne semblent alors pas complètement dépendantes de l'information génétique (Kahn, 2007 ; Rose, 2006).

Les stimulations du monde extérieur jouent alors un rôle majeur et ce phénomène est très marqué pour nos systèmes sensoriels qui dépendent directement d'une stimulation provenant de l'environnement (la vision, l'ouïe, l'odorat ...). Par exemple, si l'œil n'est pas stimulé par de la lumière dès le début de la vie, comme c'est le cas chez les enfants atteints de cataracte, alors il ne pourra jamais être capable de voir et conduira à la cécité. La stimulation par la lumière est indispensable dès le début de la vie pour que les connexions neuronales nécessaires à la vision se construisent. On parle alors de période critique ou de période sensible pour définir le moment où le système neuronal en question se met en place

grâce à la stimulation extérieure. Pendant cette période, si la stimulation extérieure n'a pas lieu, alors le système sera défaillant.

Même si on vient de voir que la période précoce du développement cérébral obéit de manière importante aux stimulations extérieures, via la plasticité de notre cerveau, cette dernière s'effectue également à l'âge adulte. Ainsi, les zones du cerveau de la représentation dans l'espace sont plus développées chez les chauffeurs de taxi, et ce, proportionnellement à leur nombre d'années d'expérience (Maguire, 2000). Il en est de même pour les zones attribuées au calcul chez des mathématiciens (Aydin, 2007) ou encore la zone qui contrôle la motricité de la main chez des pianistes.

C'est aussi la plasticité cérébrale qui permet la récupération de fonction après un accident vasculaire cérébral par exemple (Fedy, 2002).

2) Compensation sensorielle

Dans cette partie, il est question de savoir si le déficit d'un système sensoriel peut induire l'amélioration de l'efficacité d'un autre système sensoriel, via la plasticité cérébrale. Ainsi, le déficit serait compensé par cette amélioration.

Et en effet, il a été montré une amélioration de la fonction olfactive chez un modèle de souris aveugles, associée à la mise en évidence d'une plasticité cérébrale. (Touj, 2021)

Pour évaluer la fonction olfactive des souris aveugles, trois tests ont été réalisés : un test de recherche alimentaire, un test de seuil olfactif et un test dit d'identification olfactive qui consiste en la reconnaissance d'une odeur à valence positive ou négative (Figure 52). Le test de recherche alimentaire est une mesure du temps mis par la souris pour retrouver une croquette cachée sous la litière de la cage. Le test de seuil olfactif consiste à déterminer la plus faible concentration d'odeur cible (ici cannelle et rose) que la souris peut détecter. Enfin le test d'identification olfactive consiste en la mesure du temps passé par la souris sur une odeur attractive ou aversive par rapport à une odeur d'eau (neutre).

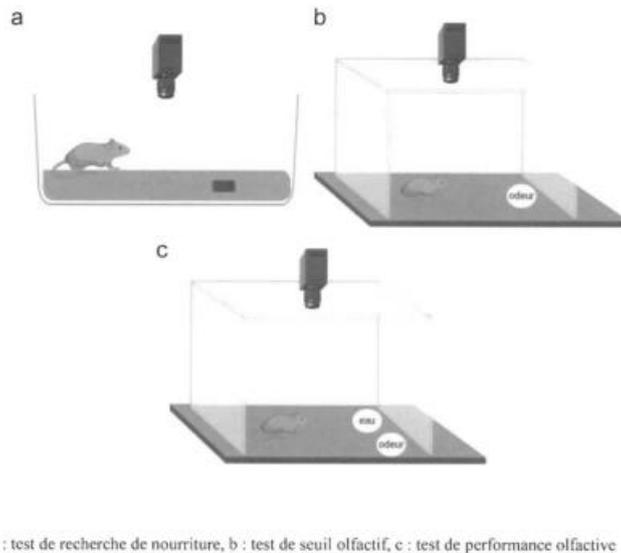


Figure 52 : Représentation schématique des 3 tests olfactifs utilisés (Touj, 2021)

Les résultats ont montré de meilleures performances dans le test de recherche et dans le test d'identification chez les souris aveugles par rapport à des souris témoins, alors que le résultat dans le test du seuil de détection olfactive est similaire pour les deux groupes. Ces résultats concordent avec ceux des études menées sur l'Homme même si elles sont parfois contradictoires en raison des différents protocoles utilisés.

On pourrait expliquer l'absence de différence de seuil olfactif entre les deux groupes par le fait que cette tâche ne demande pas un traitement complexe de l'information et pourrait dépendre uniquement des structures olfactives périphériques.

Finalement, les individus aveugles, humains ou animaux, sont en général plus attentifs aux signaux non visuels, et notamment olfactifs. Ainsi, le traitement de l'information est plus efficace. Dans l'étude faite sur les souris, cela se traduit par des souris aveugles plus attentives aux nouvelles odeurs et plus rapides pour identifier la valence positive ou négative d'une odeur. La compensation n'est alors pas purement sensorielle et semble aussi mettre en jeu une composante mémorielle, motivationnelle et attentionnelle. Ainsi, la faculté des souris aveugles à identifier un danger avec leur odorat serait meilleure et permettrait de compenser le fait qu'elles ne peuvent pas identifier visuellement soit un danger, soit une source de nourriture.

Cette compensation est donc un mécanisme favorisant la survie de l'individu et il semble être lié à la plasticité cérébrale.

En effet, l'analyse histologique des cerveaux des souris de l'étude montre une augmentation du volume des bulbes olfactifs chez les souris aveugles, ainsi qu'une augmentation de volume d'autres aires olfactives comme le cortex piriforme. On sait de plus que la taille du bulbe olfactif influe sur les performances olfactives. Les analyses IRM montrent quant à elles une augmentation de volume du noyau olfactif antérieur ainsi que du tubercule olfactif, deux structures très impliquées dans la réponse aux stimuli olfactifs.

On peut alors suggérer que les meilleures performances d'identification des odeurs lors de la tâche résulterait d'une modification de l'activité de ces structures (bulbe olfactif et structures secondaires et associatives) (Touj, 2021).

3) Modèle proposé

Chez le dalmatien atteint de surdité neurosensorielle, on observe une perte neuronale dans le ganglion spiral à partir de la première année de vie. De plus, on rapporte que le volume du cortex cérébral dédié à l'audition diminue de 40 % en cas de surdité (Sampaio et al., 2010 ; Ferrara et Halnan, 1983).

Mon hypothèse de travail consiste à réfléchir sur les performances olfactives du dalmatien sourd. Est-ce qu'un mécanisme de compensation sensorielle se met en place ?

Pour cela on se demande si les aires auditives sont remobilisées au profit de la fonction olfactive via la faculté du cerveau à se modeler en fonction de ses expériences, c'est-à-dire grâce à la plasticité cérébrale. On peut aussi formuler l'hypothèse que le dalmatien sourd soit plus vigilant à tous les autres types de signaux qui amélioreraient ses performances olfactives, par un phénomène d'attention. Comme il ne peut pas être distrait par les stimuli auditifs il serait plus attentif aux autres stimuli et donc plus efficace dans la tâche olfactive. Ou encore que du fait de sa surdité, il a développé une sensibilité accrue au flux aérien, et qu'il s'en sert pour identifier au mieux une source d'odeur.

Dans tous les cas, la première étape de ce questionnement revient à tester si, effectivement, les dalmatiens sourds présentent de meilleures performances olfactives que les dalmatiens bi-entendants et la finalité de cette thèse est précisément de mettre au point et valider une méthode expérimentale permettant d'objectiver cette éventuelle différence. Si c'est le cas, il faudra ensuite identifier par quels mécanismes cela est possible.

L'euthanasie des chiots sourds est encore souvent pratiquée alors qu'ils n'ont pas de problème de santé. Si leur surdité entraîne une amélioration de leurs performances olfactives, on peut espérer qu'il y aura une autre issue à leur existence en en faisant, pourquoi pas, de remarquables chiens d'utilité.

Deuxième partie : Étude personnelle

Introduction

Nous souhaitons observer s'il existe une compensation olfactive chez les chiens sourds ou pas. Si cette dernière existe nous espérons alors observer des performances olfactives significativement meilleures chez les chiens sourds que chez les chiens bi entendants.

Au cours de cette étude, deux groupes d'animaux (sourds et contrôle entendant) seront tout d'abord testés à la discipline de la recherche en salle d'odeur simple, avec des concentrations décroissantes. Dans un second temps, les animaux seront testés dans une procédure d'appariement différé (ou encore appelé « matching to sample » ou « line-up ») au cours de laquelle ils devront montrer une réponse comportementale conditionnée à la présence d'une odeur dans l'un des bocal présents sur une ligne de test qui en comporte au moins cinq. Cette procédure nous permettra de contrôler les concentrations de l'odeur cible afin de mesurer de manière précise le seuil de détection des animaux atteints de surdité que nous comparerons à celui des animaux contrôles.

Ces deux tests nous permettront (1) d'observer la performance olfactive générale du chien et (2) de déterminer son seuil olfactif. Nous pourrons ensuite comparer les résultats obtenus entre chiens sourds et chien bi entendants.

Les chiens seront d'abord formés à la recherche de l'odeur cible. Cette formation à la recherche comporte 3 phases.

La première phase du protocole consiste à familiariser (cf Première partie : III. B. 2) a.) le chien sur un jouet et à le familiariser avec la pièce dans laquelle l'épreuve de recherche sera conduite.

La deuxième phase consiste à créer l'animal sur l'odeur cible en imprégnant son jouet avec cette odeur. Dans cette phase on lui apprendra ensuite à rechercher son jouet (et donc l'odeur) dans la pièce via la technique du simulacre de pose.

Enfin, la troisième phase consiste à faire chercher au chien l'odeur cible sur un support neutre dans le but d'obtenir son jouet (cf. Première partie : III. B. 3) b.). C'est au cours de cette dernière phase que les performances des chiens seront enregistrées et comparées.

I. Matériel et méthodes

Six chiens ont été recrutés, trois dalmatiens sourds bilatéraux et trois dalmatiens bi entendants. Outre la race, les critères retenus étaient la bonne santé, ainsi que le jeune âge des individus (dans la mesure du possible car l'apprentissage est alors facilité), et surtout la proximité géographique du lieu de résidence des propriétaires par rapport à l'école

vétérinaire car c'est le lieu où se déroule les séances de travail. Le recrutement s'est alors fait en contactant directement les éleveurs de dalmatiens, les associations comme Dalmatien Sans Famille et par la diffusion d'un dépliant (annexe). Nous avons également recruté les deux dalmatiens d'étudiants présents sur le campus. Deux des dalmatiens sourds ont été récupérés à l'âge de deux et six mois directement auprès de l'éleveur puis nous les avons fait adopter par des étudiants de l'école. Finalement, parmi les six chiens, quatre appartiennent à des étudiants vétérinaires de Lyon, et les deux autres résident à moins de 20 minutes de l'école.

Le tableau VIII présente les caractéristiques principales des deux groupes de chiens sélectionnés.

Tableau VIII : La cohorte de chien utilisés pour l'étude

Groupe Sourd	Groupe Entendant
Maya ; femelle stérilisée de 6 ans	Pastèque ; femelle stérilisée de 3 ans
Papi ; mâle castré de 2 ans	Looping ; mâle castré de 2 ans
Simba, mâle entier de 1 ans	Roi ; mâle entier de 1 ans

- Phase 1 : Fanatisation et familiarisation

Le jouet sur lequel nous avons décidé de fanatiser les chiens est un boudin rembourré en tissu de la marque Morin (Figure 53). Chaque chien a son boudin personnel, et il n'y a accès qu'en notre présence. On ne laisse pas le boudin de jeu aux propriétaires, le chien y a accès uniquement lorsque l'on travaille avec lui.



Figure 53 : Boudins de jeux utilisés lors de l'étude
(Crédit Image : CHALARD Clément)

Pour fanatiser le chien, on utilise la méthode indiquée dans la partie III B. 2) a. Chaque chien est testé une fois par semaine ou toutes les deux semaines pour une séance de jeu avec son boudin. Au début, les séances se font à l'extérieur pendant une balade ; peu à peu on passe à des séances en intérieur avec des obstacles. Pour finir, les séances se font dans la bibliothèque du service de physiologie de l'école vétérinaire car c'est la pièce qui a été choisie pour le test de recherche d'odeur. Ainsi, le chien se familiarise avec cet endroit inconnu et ne sera pas perturbé lors de la suite du protocole.

- Phase 2 : Créancement et simulacre de pose

Le créancement correspond à l'introduction de l'odeur au niveau du jouet du chien pour ensuite lui apprendre à rechercher cette odeur via le simulacre de poses.

L'odeur que nous avons choisi comme odeur cible était dans un premier temps une odeur de banane représentée par le composé chimique d'isoamylacétate (Figure 54). Cette molécule volatile odorante est souvent utilisée en recherche fondamentale au cours des tâches d'apprentissage olfactif permettant d'appréhender, chez des modèles animaux, les structures centrales impliquées dans la mémorisation.

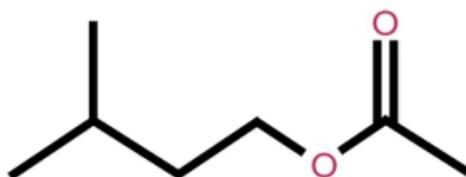


Figure 54 : Structure chimique de l'isoamylacétate
(Crédit Image CHALARD Clément)

Nous avons d'abord présenté cette odeur à tous les chiens de l'étude dans un contexte complètement neutre, c'est-à-dire en dehors d'une séance de travail, afin de vérifier que celle-ci ne provoquait pas de réactions négatives chez les sujets.

Lors de cette séance, deux chiens (Papi et Pastèque) ont manifesté une aversion à la molécule lors du premier contact. Nous avons donc décidé de changer d'odeur cible et d'utiliser l'éthylmaltol (Figure 55), qui dégage une odeur proche de celle du caramel ou de la barbe à papa et pour laquelle aucun chien n'a montré de réaction négative.

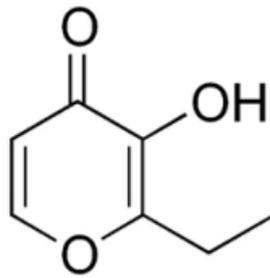
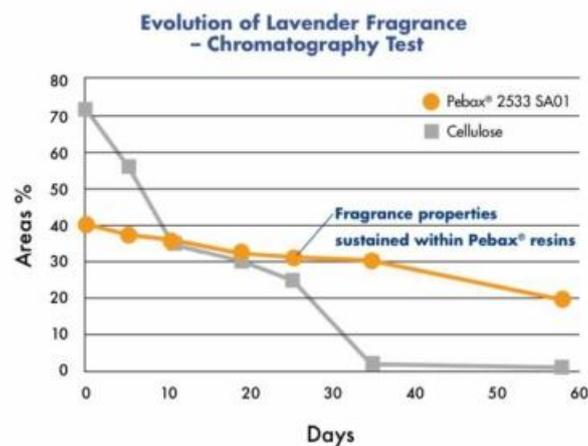


Figure 55 : Structure chimique de l'éthylmaltol
(Crédit Image : CHALARD Clément)

Afin d'imprégner les boudins avec l'odeur cible nous avons utilisé des polymères plastiques, sur lequel nous avons déposé la solution odorante de concentration connue. Ces polymères sont des billes (les Pebax Elastomers (cf annexe)) qui adsorbent la solution odorante et ont l'avantage de maintenir la stabilité de cette odeur dans un milieu clos (Figures 56, 58).



En orange, la courbe représente le % de molécule odorante dans le milieu (en ordonnée) quand la solution mère a été déposée sur les billes de polymères ; En noir quand elle a été déposée sur de la cellulose.

Figure 56 : Evolution du parfum de lavande en fonction du temps (ARKEMA Innovative Industry)

Une fois les billes imbibées avec la solution de l'odeur cible, nous les avons placées dans un bocal hermétique (Figures 57, 58) avec le boudin de jeu pendant 24 heures (temps nécessaire à l'imprégnation du boudin). Les billes étaient placées au fond du bocal sans contact direct avec le boudin (grâce à la forme concave du fond du bocal).



Figure 57 : Bocal utilisé pour imprégner les boudins de jeux avec l'odeur cible (Crédit Image : CHALARD Clément)

A l'issue de cette période, les séances de travail ont repris, avec, d'abord, des séances de jeu pour que le chien mémorise l'odeur. Puis les chiens ont été soumis au simulacre de poses afin de leur apprendre à chercher leur jouet odorisé.



Figure 58 : Résumé du protocole utilisé pour imprégner le boudin de jeu avec l'odeur cible (Crédit Image : CHALARD Clément)

Chaque chien est testé au minimum une fois toutes les deux semaines. Une séance idéale ne dure pas plus de 20 minutes de manière à conserver la motivation du chien. Elle commence par du jeu avec le boudin, puis un exercice facile. Par exemple, on place le boudin face au chien, deux mètres devant lui et ensuite on lui donne l'ordre de chercher. On augmente la difficulté progressivement, il est important de tenir compte des capacités de chaque chien de façon à éviter une mise en échec qui compromettrait sa motivation. Après l'exercice facile et la récompense associée (jeu, caresses et félicitations verbales) on accroît donc la difficulté dans un nouvel exercice (boudin à trois mètres par exemple). Si on sent le chien encore bien motivé on réitère puis on finit par un nouvel exercice facile qui ne demande pas beaucoup d'effort pour obtenir une récompense et la séance se finit donc par une session de jeu. Finalement, pendant la séance, au total, on aura demandé au maximum trois ou quatre exercices rapides au chien.

Lors des premières séances, le propriétaire nous accompagne, pour rassurer le chien. Ensuite si tout se passe bien nous pouvons faire des séances sans la présence du propriétaire. Dans tous les cas, avant chaque séance, le contact avec le chien se fait à l'extérieur, puis nous allons dans la pièce de travail et nous ramenons le chien à l'extérieur à la fin de la séance. Si un chien perd de la motivation sur une séance, alors on demande au propriétaire de revenir pour la

séance suivante. Étant donné que nous adaptons les horaires et les jours de travail en fonction des emplois du temps de chacun, nous n'avons pas de contrôle sur l'espacement vis-à-vis du dernier repas ou du dernier exercice physique fait par le chien.

Afin d'objectiver au mieux le niveau d'apprentissage de chaque chien et de pouvoir adapter chaque séance en fonction du niveau acquis par chaque sujet, nous avons réparti leurs performances respectives dans une grille d'évaluation (Tableau IX).

Tableau IX : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation des chiens au fil des séances. (Ici Papi)

NE = Non évalué ce jour ; En orange les jours où le boudin imprégné a été utilisé.

Date	Renifle	Prend dans la gueule	Court après quand on le lance	Se dirige vers le boudin quand il le voit	Cherche le boudin
20/09	+	+	+	+	NE
24/09	+	+	+	+	+
03/10	+	+	+	+	+
07/10	+	+	+	+	+

Cette grille récapitulative était complétée de notes écrites permettant d'apporter des précisions telles que la difficulté des exercices demandés, la présence du propriétaire ou toute autre information que nous jugions importante comme l'heure du dernier repas ou encore l'état de santé de l'animal. À noter que quand le propriétaire est présent, il permet simplement de rassurer le chien et de fournir des encouragements supplémentaires mais ne participe pas à la mise en place du travail.

NB : Du fait de difficultés rencontrées lors de cette phase (motivation insuffisante des chiens par rapport aux odeurs utilisées) nous avons décidé de changer le protocole initialement prévu. Pour des raisons de délais administratifs nous concernant et de disponibilité insuffisante des sujets de notre étude, nous n'avons pas pu tester ces nouvelles modalités expérimentales qui font l'objet du travail, actuellement en cours, de thèse vétérinaire d'Emilie BOULARD, qui a par ailleurs largement contribué à notre travail initial.

Dans l'hypothèse de la sélection de sujets suffisamment motivés par les odeurs des corps purs choisis, notre protocole aurait comporté idéalement deux phases supplémentaires que nous allons maintenant décrire.

- Phase 3 : Substitution et évaluation.

Lors de la phase précédente, le chien a appris à reconnaître une odeur puis à la chercher en cherchant son boudin de jeu à la suite du simulacre de pose.

Cette dernière phase consiste, elle, à remplacer le boudin de jeu par un support neutre, par exemple un simple tissu dans un bocal ouvert, ainsi qu'à demander au chien de chercher ce support sans simulacre de pose.

Pour cela, il faut au préalable imprégner le tissu avec l'odeur cible en utilisant la même méthode que lors de l'imprégnation du boudin de jeu (Figure 58). On place ensuite le tissu dans un bocal ouvert que l'on place à un endroit de la pièce de travail, tandis que le chien se trouve derrière la porte. On ouvre ensuite la porte et on ordonne au chien de chercher.

Quand il trouve le tissu, on fait discrètement tomber un boudin de jeu de notre poche et on récompense le chien (jeu, caresses et félicitations verbales). Ainsi le chien conserve sa motivation car il associe le fait de trouver le support neutre à l'apparition de son jouet.

Une fois que le chien a acquis cette capacité, on peut alors évaluer ses performances. Lors de l'évaluation nous avons décidé de relever deux paramètres qui sont le temps de recherche et le taux de réussite ; tout en faisant varier la difficulté selon deux autres paramètres qui sont la difficulté de cache et la concentration en odeur.

Le temps de recherche, ou latence, correspond tout simplement au temps que met le chien pour trouver le tissu à partir du moment où on lui ordonne de le chercher. Au-delà de deux minutes, nous considérons que l'essai est un échec et nous pouvons ainsi déterminer un taux de réussite.

Pour les paramètres de difficultés, nous classons les caches en 5 niveaux de difficultés (Tableau X) :

Tableau X : Niveau de difficulté des différentes caches utilisées

Niveau de difficulté	Hauteur de cache	Visible depuis le point de départ du chien	Distance de la porte
1	Au sol	Oui	Inférieure à 2 mètres
2	Au sol	Oui	Supérieur à 2 mètres
3	Au sol	Non	Aléatoire
4	En hauteur	Oui	Aléatoire
5	En hauteur	Non	Aléatoire

Nous faisons également varier la concentration en odeur cible. Il suffit alors d'utiliser une solution mère d'odeur cible deux fois moins concentrée lors de l'imprégnation du tissu pour avoir une odeur finale deux fois moins forte dégagée par le tissu.

Nous évaluons chaque chien sur les cinq niveaux de caches possibles et en utilisant trois concentrations différentes, soit au total quinze valeurs évaluatives par chien. Ainsi nous pouvons comparer les performances du groupe sourd et du groupe bi-entendant.

Un dernier paramètre que nous souhaitons relever consiste à suivre le cheminement du chien dans la pièce grâce à une caméra. De cette manière nous aurions pu voir l'efficacité du trajet du chien jusqu'à sa cible, par exemple est ce qu'il passe devant plusieurs fois avant de l'atteindre.

- Aparté : La procédure d'appariement différé (ou encore appelée « matching to sample » ou « line-up »)

Afin de pouvoir déterminer le seuil olfactif des chiens, nous avons prévu de leur apprendre une seconde tâche olfactive appelée le « line up ». Cette méthode est pratiquée notamment par la Police Technique et Scientifique en odorologie. Les billes de polymère auraient servi de substrat d'adsorption de l'odeur cible.

Sur une ligne, espacés d'environ un mètre, on place cinq bocaux en verre contenant le même nombre de billes de polymère, parmi lesquels un seul contient le substrat odorant. Les bocaux ouverts sont placés sur un support métallique de manière à pouvoir les déplacer sans les

toucher. On fait ensuite entrer le chien dans la pièce et on lui présente un bocal (qui n'est pas dans la ligne) qui contient des billes de polymères odorisés avec l'odeur cible. Le chien doit échantillonner ce bocal de manière à mémoriser l'odeur cible qui se trouve dans la ligne. Puis le chien parcourt la ligne librement afin de flairer l'ensemble des bocaux. S'il détecte la présence de l'odeur cible dans l'un d'entre eux alors il montre une réponse conditionnée (par exemple un aboiement). Si l'odeur cible n'est pas présente, il revient simplement au point de départ.

Cette méthode est également utilisée dans les projets où le chien est utilisé pour la détection de biomarqueurs odorants exprimés dans certaines pathologies comme le cancer ou le Covid par exemple (projet NOSAÏS). Dans ces projets, les bocaux sont parfois remplacés par des boîtes pourvues d'un entonnoir métallique appelé cône d'olfaction (Figure 59).



Figure 59 : Ligne de test utilisée par l'équipe NOSAÏS
(Grandjean et al., 2022)

Dans notre cas, nous aurions utilisé cette méthode afin de déterminer la concentration à laquelle le chien ne perçoit plus l'odeur cible, c'est-à-dire son seuil olfactif. Nous aurions alors odorisé les billes de polymère avec des concentrations décroissantes d'éthylmaltol et nous aurions noté à partir de quelle concentration le chien ne réussit plus à identifier le bocal dans la ligne.

II. Résultats

Malgré les difficultés rencontrées et la modification du protocole initialement envisagé (voir Thèse de Doctorat Vétérinaire d'Emilie Boulard) nous avons obtenus des résultats partiels qui concernent les phases initiales de notre travail.

Ainsi, en ce qui concerne les phases 1 et 2 de notre protocole initial, les résultats obtenus peuvent être résumés de la façon suivante :

A. Groupe sourd

Papi était le chien le plus avancé (Grille d'évaluation : Tableau IX). La fanatisation sur le boudin semblait bonne, le chien y portait un intérêt certain. Le créancement était également abouti. Lors des phases de recherche de boudin odorisé, Papi réussissait à trouver son boudin même hors vue, avec un temps de latence assez conséquent de l'ordre de 15 à 30 secondes.

Maya étant une chienne très craintive, les séances de jeu se faisaient exclusivement chez sa propriétaire et en sa présence. Dans cette situation, Maya portait beaucoup d'intérêt à son jouet. Ensuite, les propriétaires ont également eu des soucis de santé donc les séances se sont raréfiées, il n'y en a pas eu depuis la rentrée 2021 et la mise en place de notre grille d'évaluation. Elle n'était pas familiarisée avec les locaux et cette étape aurait sûrement pris beaucoup de temps.

Simba (Tableau XI) était une toute nouvelle recrue, encore chiot. Il apprenait tout juste à jouer avec son boudin mais y portait déjà beaucoup d'intérêt. Il n'est pas passé au stade suivant car nous avons ensuite pris la décision du changement de protocole.

Tableau XI : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Simba

NE = Non évalué ce jour

Date	Renifle	Prend dans la gueule	Court après quand on le lance	Se dirige vers le boudin quand il le voit	Cherche le boudin
06/10	+	+	NE	NE	NE
26/10	+	+	+	NE	NE
17/11	+	+	+	+	NE

B. Groupe entendant :

Pastèque (Tableau XII) portait également facilement de l'intérêt à son jouet mais dans une moindre mesure que Papi. On peut dire que sa fanatisation était moins forte, avec un degré de motivation moins important. Le créancement n'était pas encore effectif mais elle savait chercher son boudin dans la bibliothèque, même s'il n'était pas encore imprégné.

Tableau XII : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Pastèque

NE = Non évalué ce jour

Date	Renifle	Prend dans la gueule	Court après quand on le lance	Se dirige vers le boudin quand il le voit	Cherche le boudin
07/10	+	+	+	+	NE
20/10	+	+	+	+	+
17/11	+	+	+	-	NE

Looping (Tableau XIII) avait une motivation très variable, souvent dépendante de la présence de sa propriétaire. Il n'était pas totalement familiarisé avec la bibliothèque et les bruits de couloir pouvaient le déconcentrer très vite. On peut dire qu'il n'était pas encore suffisamment fanatisé.

Tableau XIII : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Looping

NE = Non évalué ce jour

Date	Renifle	Prend dans la gueule	Court après quand on le lance	Se dirige vers le boudin quand il le voit	Cherche le boudin
28/09	+	+	-	NE	NE
12/10	+	+	+	+	NE
27/10	+	+	+	+	+
10/11	+	+	+	+	NE

Roi (Tableau XIV) a présenté des soucis de santé, notamment de dentition, ce qui a rendu compliqué son intéressement au boudin. Il était de plus assez perturbé par les environnements nouveaux, il a donc fallu faire des séances de jeu à la maison pour qu'il s'y intéresse. L'étape suivante, avant l'arrêt du protocole, consistait à le familiariser avec les locaux.

Tableau XIV : Grille d'évaluation utilisée pour suivre la motivation de Roi

NE = Non évalué ce jour

Date	Renifle	Prend dans la gueule	Court après quand on le lance	Se dirige vers le boudin quand il le voit	Cherche le boudin
29/09	+	+	+	+	NE
14/10	+	-	-	NE	NE

C. En résumé

L'avancée de chaque chien vis-à-vis des principales étapes du protocole est indiquée dans le tableau XV :

Tableau XV : Bilan des acquisitions de chaque chien à la suite du protocole

NR = Non réalisé ; En rose les chiens sourds

Chien	Fanatisation	Familiarisation	Créancement	Simulacre de pose	Substitution	Evaluation
Papi	Acquis	Acquis	Acquis	Acquis	NR	NR
Simba	Acquis	NR	NR	NR	NR	NR
Maya	Insuffisant	Non acquis	NR	NR	NR	NR
Pastèque	Moyen	Acquis	NR	Acquis	NR	NR
Looping	Insuffisant	Insuffisant	NR	NR	NR	NR
Roi	Insuffisant	Non acquis	NR	NR	NR	NR

III. Discussion

Notre premier protocole s'inspirait des méthodes de dressage des chiens de travail de la Gendarmerie Nationale en basant le processus d'apprentissage sur le jeu. Cependant, nous avons rencontré des difficultés à instaurer et à maintenir un intérêt des chiens pour leurs jouets suffisamment fort pour que leur motivation à travailler soit stable. Ceci a entaché notre propre motivation à motiver les chiens eux-mêmes et c'est donc un cercle vicieux qui s'est

installé, menant à changer de source de motivation. En effet, dans le nouveau protocole la source de motivation pour le chien ne sera plus le jeu mais la nourriture.

Nous allons alors discuter des différentes causes pouvant être à l'origine de l'échec de notre premier protocole.

A. Tempérament et traits de caractère des chiens :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, outre les qualités olfactives morphologiques des différentes races de chien, le caractère du chien est primordial pour en faire un chien efficace au travail olfactif.

Si on s'en tient aux races utilisées pour le travail en France, on trouve des chiens dit « rapporteurs », principalement le Labrador ; et des chiens de berger, principalement le Berger Belge Malinois et le Berger Allemand. Ces trois races représentent la très grande majorité de l'effectif des chiens de travail en France. Le Dalmatien, lui, est un chien de race appartenant au groupe des chiens dit « courants », c'est-à-dire des chiens qui traquent le gibier au cours d'une chasse pour l'épuiser. Aujourd'hui, le Dalmatien est plutôt un chien de compagnie mais il partage effectivement les traits de caractère ancestraux propre à son groupe. D'après Jamieson et al. (cf. Tableau IV) (Jamieson et al., 2017) les chiens courants présentent certaines caractéristiques : la sociabilité, l'entêtement, sont plus ou moins facile à dresser, exclusifs avec leur maître et travaillent mieux en laisse car leur énergie débordante peut avoir besoin d'être canalisée. Les chiens rapporteurs sont eux plutôt : peu agressifs, coopératifs avec l'Homme, facile à dresser et avec un bon instinct de chasse. Tandis que les chiens de bergers sont : faciles à dresser, très joueurs et intelligents, coopératifs avec l'Homme, intrépides et solutionneurs indépendants (cf ci-dessous) ; autant de qualités qui justifie leur très grande majorité au sein des chiens de travail.

On comprend alors rapidement que le dalmatien ne partage pas tous les traits de caractère des races utilisées couramment, et donc des races « idéales ». C'est sûrement une des raisons qui a rendu le travail plus difficile mais nous étions contraints d'utiliser cette race car c'est la race avec la plus forte prévalence de surdité congénitale.

Les chiens de notre étude n'étaient effectivement pas les plus joueurs que l'on puisse rencontrer dans une vie de vétérinaire, bien que pas non plus les moins joueurs. Cependant l'attrait pour le jeu quasi obsessionnel/fanatique est un point clé pour la sélection d'un chien de travail. L'instinct de chasse semble être aussi un point important (Maejima et al., 2007 ; Hurt et Smith, 2009 ; Reed et al., 2011 ; Beebe et al., 2016 ; Minhinnick et al., 2016). Le dalmatien étant un chien courant, cet instinct est bien présent au sein de la race. Or, nous nous sommes effectivement confrontés à un manque d'attrait de nos chiens pour le jouet, du

moins pas suffisant pour les faire travailler efficacement. Nous avons donc vérifié que le caractère joueur du chien est primordial si on choisit cette méthode de dressage. On peut alors se demander comment augmenter l'attrait d'un chien pour le jeu quand cela n'est pas dans ses traits de caractère primaires. Il est évident qu'un élément de réponse se trouve dans l'éducation du chiot et la mise en place d'un rapport au jeu plus ou moins fort dès le plus jeune âge. Mais nous n'avons pas recruté tous les chiens de la cohorte quand ils étaient chiots donc c'est un paramètre que nous n'avons pas pu toujours contrôler. Ceci pourrait expliquer le fait que les chiens que nous avons recrutés chiots (Papi et Simba) semblaient tout de même porter plus d'intérêt pour le jeu, et donc pour le travail. Imprégner directement le boudin de jeu avec une odeur alimentaire pourrait être une solution pour augmenter la motivation au jeu des chiens que nous avons recruté à l'âge adulte. Effectivement, nous avons remarqué, et il est admis au sein de la race, que les dalmatiens sont très gourmands et possèdent un intérêt très fort pour la nourriture, qui les poussent même à beaucoup voler chez leurs propriétaires. Cependant, je pense que le chien finirait vite par comprendre que même s'il a une odeur de nourriture, son boudin de jeu ne se mange pas et donc ne l'intéresse pas vraiment. C'est pour cela que pour le nouveau protocole, nous avons décidé d'utiliser de la nourriture en tant que telle et pas d'essayer de faire croire au chien que son jouet est de la nourriture.

Le dalmatien est aussi un chien réputé pour être débordant d'énergie, utiliser une longe lors des séances de travail nous aurait peut-être permis de canaliser cette énergie pour la mettre au profit du travail demandé. Promener le chien sur une longue balade avant la séance de travail aurait aussi pu être une solution pour avoir un chien plus concentré mais nous avons vu précédemment que la fatigue physique diminue les performances olfactives du chien et c'était de toute manière difficile à organiser.

Enfin, pour finir cette discussion vis-à-vis de la race que nous utilisons par rapport aux races utilisées habituellement comme chien de travail, il est intéressant de regarder le travail de Coren (Coren, 1994). En effet, ce dernier a classé 133 races de chien en fonction de leur « intelligence de travail » ; qui correspond en fait à leur capacité à apprendre avec les humains. Ainsi, on retrouve le Berger Allemand en 3^{ème} position et le labrador en 7^{ème} position avec pour ces deux races moins de cinq répétitions pour comprendre un nouvel ordre, suivi d'un taux d'obéissance à la première commande de 95 % minimum. Le Berger Belge Malinois pointe lui à la 22^{ème} position avec cinq à 15 répétitions pour comprendre un nouvel ordre, suivi d'un taux d'obéissance à la première commande de 85 % minimum. En comparaison, pour le dalmatien (39^{ème} place) c'est 20 à 25 répétitions pour comprendre un nouvel ordre, et un taux d'obéissance à la première commande de 70 %. Encore une fois, on comprend qu'il est assez normal pour nous de rencontrer plus de difficultés en utilisant cette race.

Outre les traits de caractères globaux du chien, que nous pouvons attribuer à une race ou à une autre, le tempérament, c'est-à-dire le caractère attribué à l'individu, peut lui aussi être plus ou moins favorable au travail et il est indispensable de le prendre en compte dans le choix

du chien, peu importe la race (Graham et Gosling, 2009 ; Mc Garrity et al., 2016). Pour illustrer ça, nous allons alors comparer nos dalmatiens entre eux.

Précédemment nous avons parlé du caractère joueur d'un chien, point clé pour en faire un bon chien de travail. Et effectivement, nous avons pu exacerber le caractère joueur des chiens que nous avons recrutés chiots, tel que Papi et Simba, en intégrant très tôt le jeu au centre de leur éducation. Ces deux chiens nous sont par la suite apparus bien plus motivés par le jeu et le travail.

Un autre point essentiel à l'efficacité d'un chien de travail olfactif semble être le degré d'indépendance du chien, un chien trop indépendant n'écouterait pas les ordres, tandis qu'un chien trop dépendant sera trop fixé sur son maître et sera incapable de trouver seul la solution (Rebmann et al., 2000 ; Rooney et Bradshaw, 2004 ; Hurt et Smith, 2009 ; Adamkiewicz et al., 2013). Nous avons pu vérifier ce type de comportement en observant chez certains chiens (Looping par exemple) un besoin de l'approbation ou de la présence de leur propriétaire pour agir. Ces chiens-là se sont montrés assez inconstants dans leurs séances de travail et, globalement, nous avons remarqué que plus un chien regarde son maître pendant la séance de travail, c'est-à-dire quand on lui demande de chercher son jouet, moins il est efficace car il n'est pas proactif et attend plutôt une information venant de son maître. On parle alors de la capacité du chien à être solutionneur indépendant ou auto-solutionneur (Prato-Previde et al., 2008 ; Marshall-Pescini et al. 2009).

Au vu de tous les stimuli différents auxquels un chien de travail peut être confronté, sa faculté d'adaptation et sa gestion du stress sont des aspects importants (Brownell et Marsolais, 2002 ; Hurt et Smith, 2009). Un chien plutôt intrépide ou familiarisé avec des expériences multiples dès son plus jeune âge sera alors plus à même de travailler efficacement, contrairement à un chien peureux et anxieux (Van Rooy et al., 2014 ; Graham et Ghosling, 2009 ; Adamkiewicz et al., 2013) comme cela a été le cas pour Maya. Maya est une chienne très peureuse, la présence de ses propriétaires et le fait d'être dans son environnement, c'est-à-dire chez elle, étaient indispensables pour pouvoir interagir avec elle et la faire jouer. Il était alors très compliqué d'imaginer la faire progresser dans son apprentissage.

Les trois traits de caractère individuels vu ici nous confirment qu'il existe un profil de chien, plus ou moins indépendant de la race, favorable ou non pour apprendre le travail olfactif. Hélas les chiens de notre cohorte n'ont pas tous montré ce profil idéal. Il existe de nombreux tests pour déterminer le profil individuel d'un chien et ainsi prédire son aptitude à tel ou tel travail. Bien que non standardisé, ils permettent néanmoins de se faire une idée (Brownell et Marsolais, 2002).

Afin d'éviter d'intégrer des profils de chien incompatibles dans notre étude, comme c'est le cas de Maya, nous aurions pu utiliser l'un de ces tests et écarter les chiens au profil anxieux

de notre recrutement par exemple. Nous ne l'avons pas fait car les contraintes de notre recrutement nous apparaissaient déjà suffisamment grandes. Effectivement, le fait de ne recruter que des dalmatiens proches du campus vétérinaire de Lyon et disponibles facilement et fréquemment pour faire des séances de travail est déjà un critère très sélectif car nous travaillons avec des chiens de propriétaires et non des chiens spécialement à disposition pour l'étude.

B. Efficacité du binôme maître/chien

Le caractère de nos chiens n'a sûrement pas été la seule barrière à un apprentissage réussi et il paraît évident de réfléchir aussi sur nos propres compétences et sur le binôme que nous formons avec le chien. Dans cette partie nous différencions le maître du propriétaire. Par maître nous entendons la personne qui travaille avec le chien, et par propriétaire la personne qui vit avec le chien.

La relation entre un chien et son maître est primordiale pour que le binôme fonctionne (Rebmann et al., 2000 ; Abney, 2009), elle doit être forte, basée sur de la confiance et de la cohérence car une mauvaise expérience ou un conflit peuvent durablement compromettre la réussite du binôme dans le travail (Smith et al., 2003). De la même manière que tous les chiens ne peuvent être des bons chiens de travail, tous les Hommes ne peuvent pas être de bons maîtres de chien de travail. D'après Rebmann et al., parmi les principales qualités requises figure la connaissance des principes de dressage et la capacité à comprendre le langage corporel du chien. (Rebmann et al., 2000). L'expérience en tant que maître de chien de travail influence également la réussite du binôme (Gutzwiller, 1990), tout comme la compatibilité entre le maître et le chien (Hurt et Smith, 2009).

Nous avons pu constater l'importance réelle de la relation entre le maître et le chien et son impact sur l'efficacité du binôme grâce au cas de Papi. Papi était le chien le plus efficace et le plus avancé dans le protocole. Il était déjà capable de chercher son boudin de jeu imprégné avec l'odeur cible, même hors de vue. Avec lui, l'apprentissage semblait simple et constant. Papi a été acquis alors qu'il était un chiot, juste avant le confinement ; c'est moi qui l'ai éduqué jusqu'au déconfinement, après quoi il a été adopté. Le lien et la relation maître/chien est alors beaucoup plus forte avec lui qu'avec les autres chiens de la cohorte. Ceci pourrait expliquer la vraie différence entre le niveau d'apprentissage de Papi et celui des autres chiens. D'autant plus que c'est ensuite Emilie Boulard, étudiante en thèse sur la poursuite du projet, qui l'a adopté et a poursuivi les séances de travail. Finalement, Papi a toujours eu son propriétaire comme maître, c'est sûrement la raison pour laquelle il était bien plus efficace.

En outre, une autre observation nous permet de valider l'importance de cette relation maître/chien. En effet, Pastèque était la chienne de la petite amie de mon colocataire. Des

interactions hors séance de travail ont alors été fréquemment possible, puisque nous partageons parfois le même lieu de vie. A posteriori, cela a permis de développer un lien plus fort avec elle, ce qui a facilité ensuite les séances de travail. Même si elle avait parfois besoin de la présence de sa propriétaire pour être motivée, Pastèque s'adaptait plus facilement que les autres chiens au travail demandé. Il se peut que la relation maître/chien plus aboutie avec Pastèque soit à rapprocher de cette meilleure adaptation.

De manière plus globale, nous avons pu manquer de cohérence dans nos procédures de travail avec les chiens. Nous avons été deux maîtres à travailler avec les chiens, et nous sommes forcément différents malgré le fait que nous avons essayé de conserver une certaine analogie dans la méthode de travail. Pour le chien, le fait de travailler toujours avec la même personne est important, d'autant plus pour une race dite « exclusive » comme le Dalmatien, et l'expérience montre que la plupart des chiens de travail sont utilisés par un seul et unique maître.

Aussi, malgré les stages que j'ai pu faire auprès d'équipes cynotechniques, nous restons novices dans la formation d'un chien au travail olfactif. Des erreurs ont alors sûrement été commises et elles ont pu entacher la motivation des chiens. Par exemple avec un exercice de trop, ou encore un exercice qui met en échec le chien. Face à un échec le chien peut perdre sa motivation à l'exercice demandé et il est parfois difficile d'estimer si la tâche demandée à un chien est « dans ses cordes » à l'instant t. De la même façon, comprendre à temps que le chien n'a plus envie n'est pas aisé, et le contraindre à un dernier exercice aura un effet très négatif et durable sur sa motivation.

Lorsqu'un chien cherche une odeur et qu'il s'approche de la source odorante, son comportement change et il sollicite l'attention du maître pour obtenir une information, on dit qu'il fixe l'odeur ; il a alors besoin d'un encouragement du maître pour continuer la recherche et réussir la tâche demandée, or, si le maître ne s'aperçoit pas de ce changement subtil de comportement alors il n'encouragera pas le chien ce qui conduit inévitablement à une perte de motivation voir à un échec. Il est possible que notre expérience insuffisante n'ait pas toujours permis de pouvoir identifier ce moment et donc que le chien n'ait pas été dans une relation de confiance totale.

C. Fréquence et environnement d'entraînement :

Nous nous sommes appuyés sur les méthodes utilisées par la Gendarmerie pour apprendre le travail olfactif à nos chiens, cependant, nous ne sommes pas « chercheur » à temps plein, avec un chenil de chien d'expérimentation à disposition par exemple. Il est alors évident que la

fréquence ainsi que l'environnement d'entraînement n'ont pas pu être similaires à ce qui se fait dans la Gendarmerie ou dans tout autre domaine cynotechnique professionnel.

Premièrement, la fréquence des entraînements était sûrement trop faible pour tirer le meilleur de chaque chien. Les impératifs d'étudiants (examens et stages notamment) ainsi que les impératifs des propriétaires des chiens, font qu'il était très difficile voire impossible de faire travailler les chiens toutes les semaines. Le roulement mis en place permettait de faire travailler chaque chien au minimum une fois toutes les deux semaines. En comparaison, lors d'un stage de formation avec les CRS spécialisés dans le secours de haute montagne, chaque chien avait une séance de travail au minimum tous les trois jours, soit deux fois par semaine.

De plus, comme nous, les équipes de gendarmerie effectuent des séances courtes (20 à 30 minutes maximum), mais bien plus rapprochées dans le temps. Lors de la phase de débouillage (trois mois), puis celle de formation (trois mois), chaque chien fait entre deux et quatre séances par semaine. Une fois la formation recherche de stupéfiant finie, pour le maintien des acquis, il est demandé à chaque binôme de faire au minimum une séance d'entraînement par semaine, en plus du travail opérationnel (Jacquet, 2003). On se rend alors facilement compte que notre fréquence d'entraînement, et même le nombre total de séance de travail pratiquées, était bien inférieure au standard, et c'est probablement l'une des raisons de la perte de motivation des chiens et/ou de l'inefficacité du protocole.

Pour bien faire, il faudrait un maître et des chiens disponibles à plein temps, car ce travail de longue haleine ne peut pas être compatible avec un emploi du temps d'étudiant, ni avec celui d'un propriétaire lambda, d'autant plus que la cohorte est composée de plusieurs chiens. Dans l'élan de motivation, nous avons sûrement sous-estimé la charge de travail que cela représente.

Pour ce qui est de l'influence de l'environnement de travail, rappelons que nous avons choisi comme lieu de travail pour les chiens la bibliothèque du service de Physiologie de l'école vétérinaire de Lyon. C'est une grande pièce avec du mobilier (et donc des cachettes) qui pouvait être mise facilement à disposition.

Le fait de réaliser ce travail en intérieur a pu empêcher les chiens de libérer pleinement leur potentiel de jeu dans le sens où, de manière générale, un chien de propriétaire ne fera pas de grosse séance de jeu à l'intérieur mais plutôt à l'extérieur. Pire encore, un chien peut être réprimandé par son propriétaire lorsqu'il joue à l'intérieur de la maison, ainsi le chien apprend que l'intérieur n'est pas vraiment un lieu pour le jeu. Dans notre cas, le chien transpose cela lors de la séance de travail en se retenant de jouer, de peur d'être réprimandé. Et en effet, certains chiens, Looping par exemple, étaient plus joueurs dehors que dedans.

Nous aurions pu choisir le « terrain d'agility » de l'école vétérinaire de Lyon de manière à avoir un espace clos à l'extérieur mais nous n'avions pas pensé à cet aspect et peut être qu'il y aurait

eu trop d'odeurs parasites d'autres chiens sur le terrain d'agility, ce qui aurait pu distraire grandement les chiens. Finalement, si l'on dispose d'un espace adapté et à l'extérieur pour ce genre de travail, alors il sera préférable de l'utiliser.

On peut noter également que la présence de congénères à proximité (présence inopinée de chiens dans les pièces voisines) pouvait perturber les séances de travail, nos chiens étant plus intéressés par l'interaction avec le congénère que par le jouet.

Un autre point intéressant est le fait que nos chiens ne vivent pas en chenil, comparé à la majorité des chiens de brigades cynotechniques. D'après les binômes de CRS que j'ai pu côtoyer « l'effet chenil » n'est pas négligeable sur la motivation du chien. C'est-à-dire qu'un chien qui est au chenil sera extrêmement motivé lors de sa séance de travail car c'est l'activité la plus stimulante de sa journée. A l'inverse, un chien qui aurait passé l'après-midi en balade avec des congénères sera moins motivé lors d'une séance de travail puisqu'il a déjà été stimulé tout l'après-midi. Dans notre cas, nous n'avions pas le contrôle sur les activités que faisaient les chiens avant les séances de travail et cela a pu faire varier leur motivation.

On observe également le même mécanisme si on fait varier la prise alimentaire avant la séance de travail. On a vu précédemment que le jeun a tendance à augmenter les performances dans des tâches de détection et d'identification olfactives mais il augmenterait également la motivation au travail. Ainsi, si on ne nourrit pas un chien avant de lui faire sa séance de travail, celui-ci pourra être plus motivé car il attend de nous qu'on le nourrisse s'il travaille bien. A l'inverse, un chien qui aurait mangé peu avant la séance serait moins motivé. Dans notre cas, comme les séances étaient décidées surtout avec les contraintes d'emploi du temps des uns et des autres, nous n'avions pas le contrôle pour organiser une séance plutôt lointaine de l'heure du repas, ou à l'inverse plutôt rapprochée. Dans l'idéal, il ne faudrait pas nourrir le chien avant la séance de travail mais plutôt le faire travailler à jeun.

D. Molécules utilisées

Nous avons utilisé des molécules odorantes de synthèse qui sont des molécules simples dont les propriétés sont connues, notamment odorantes. Le but était de pouvoir facilement utiliser différentes concentrations pour ensuite déterminer les seuils olfactifs des chiens.

Le contrecoup fut que l'odeur de synthèse (caramel pour l'éthylmaltol) n'est pas forcément très motivante pour le chien car il n'y est pas naturellement habitué. Ceci a sûrement rendu plus difficile le dressage des chiens, toujours par défaut de motivation.

Nous avons écarté le recours à une cible/odeur alimentaire même si elle est bien plus motivante et instinctive pour le chien car il nous était apparu compliqué de faire varier de manière contrôlée l'intensité d'une telle odeur, et donc par la suite de déterminer de manière

objective les seuils olfactifs. Mais depuis, grâce aux techniques de chromatographie en phase gazeuse (GC) suivie d'une spectrométrie de masse (SPME), nous avons pu caractériser précisément le spectre quantitatif et qualitatif du mélange de molécules chimiques qui composent l'odeur émanant d'une friandise canine et aussi les quantifier quand on divise cette friandise par deux ou par quatre. Ainsi on peut faire varier la concentration d'une source odorante de manière contrôlée même si celle-ci est alimentaire.

Nous avons alors démontré la difficulté, avec nos moyens, de faire travailler des chiens sur des molécules chimiques. Ceci nous a permis d'étudier d'autres pistes, et notamment l'utilisation d'une cible alimentaire, ce qui va nous permettre de mener à bien notre étude. Ce travail sera l'objet de la thèse d'Emilie BOULARD.

E. En résumé

Nous nous sommes appuyés sur les méthodes utilisées par les équipes professionnelles cynotechniques afin d'apprendre au mieux le travail olfactif à nos chiens. Mais notre relative inexpérience combinée au manque de temps (voir de personnel) et de moyens, ainsi qu'aux difficultés plus importantes liées à la nature des molécules odorantes et à la race utilisée, nous ont mis face à une impossibilité de mener le protocole envisagé à son terme.

Nos limites dans le recrutement ne nous ont pas permis de pouvoir ne conserver que les profils de chiens les plus compatibles au travail olfactif ; dans la gendarmerie on considère que seulement 25 % des chiens repérés par la cellule achat finissent effectivement par être recrutés (Jacquet, 2003). Cette sélection drastique pour permettre une efficacité maximale ensuite nous était totalement inaccessible : en effet, devant le faible nombre total de dalmatiens disponibles à proximité de l'école vétérinaire de Lyon, il nous est apparu impossible de faire un tel tri. Des contraintes évidentes de temps et de financement rendaient bien sûr impossible la sélection et le recrutement de chiens dès leur plus jeune âge en vue de la constitution d'un «groupe expérimental » qui aurait pu être hébergé sur place.

Nous nous sommes alors retrouvés face à un constat limpide : travailler des chiens comme une équipe cynotechnique professionnelle est une tâche de longue haleine qui nécessite des moyens en temps et en finances dont nous ne disposions pas et cela même si nous étions moins exigeants sur l'efficacité finale demandée à nos chiens.

Aussi nous avons alors cherché à adapter le protocole en remplaçant le test de recherche d'odeur simple par un test de recherche alimentaire, démarche facilitée par la possibilité technique, initialement indisponible, de quantifier les molécules odorantes émanant d'une croquette de nourriture pour chien. En nous confrontant à ces difficultés méthodologiques, cette étude nous a permis d'analyser les paramètres impliqués et d'apporter des solutions aux

problèmes rencontrés de façon à proposer un protocole plus facilement réalisable et permettant l'acquisition de données quantitatives statistiquement exploitables. Ce protocole modifié servira de base au travail de thèse vétérinaire d'Emilie Boulard qui sera conduit jusqu'en 2023.

Conclusion

L'utilisation des capacités olfactives du chien par l'Homme a été effective dès le début de sa domestication et trouve encore de nos jours des applications dans de très nombreux domaines avec une efficacité remarquable. Celle-ci illustre les caractéristiques anatomiques et physiologiques exceptionnelles du système olfactif canin mais aussi la grande aptitude de l'espèce à être sélectionnée et dressée pour le travail olfactif.

La surdité congénitale héréditaire touche essentiellement des races de chien à robe blanche ou merle car l'absence de mélanocytes fonctionnels, impliqués par ailleurs dans la couleur de la robe, au niveau de certaines structures de l'oreille interne (strie vasculaire) empêche le maintien de conditions électrophysiologiques (potentiel endocochléaire) indispensables à la genèse du signal nerveux au sein de la cochlée.

Le Dalmatien est l'une des races les plus touchées par cette surdité, et donc l'une des plus étudiées. Conscients du problème, la plupart des éleveurs font dépister leurs chiots à partir de l'âge de 6 semaines grâce à un test électrophysiologique objectif (enregistrement des potentiels évoqués auditifs précoces). Malheureusement, en cas de surdité bilatérale et devant la difficulté à trouver une famille d'accueil, l'euthanasie du chiot est souvent la décision prise face à ce handicap.

Or, l'existence de phénomènes de compensation sensorielle, c'est-à-dire l'amélioration d'un sens suite à la perte d'un autre, a déjà été prouvée dans différentes espèces et notamment chez des souris aveugles, pour qui un remaniement du système olfactif ainsi qu'une amélioration des performances ont été mises en évidence (Touj, 2021).

A partir de ce constat et par analogie avec ces études préalablement publiées, notre idée a été de chercher si de tels phénomènes existaient chez des dalmatiens génétiquement sourds. En cas de résultats positifs, la surdité pourrait finalement devenir un atout, en particulier dans le travail olfactif, et ainsi permettre d'éviter des euthanasies d'individus par ailleurs en parfaite santé.

Nous avons alors donc essayé de mettre au point un protocole permettant de comparer les performances olfactives d'un groupe de chiens sourds bilatéraux, à celles d'un groupe de chiens bi-entendants, lors d'une tâche de recherche d'odeur.

Pour cela nous avons utilisé les méthodes de dressage adoptées par la Gendarmerie Nationale, mais nous nous sommes heurtés à des limites inévitables aux contraintes de notre recrutement, à la disponibilité des propriétaires des chiens sélectionnés et au temps limité dont nous disposions pour mener à bien cette étude. Les conséquences en ont été un dressage incomplet quant à la tâche demandée, compliqué par le faible nombre d'individus recrutés et les variations comportementales individuelles venant parfois interférer avec la réalisation des épreuves de recherche.

Cependant, ces difficultés nous ont conduit à faire évoluer notre protocole en remplaçant la recherche d'odeurs chimiques simples (éthylmaltol) par une recherche alimentaire (croquettes) plus instinctive et plus facile à acquérir pour le chien. Les paramètres mesurés lors de l'épreuve de recherche ont été également simplifiés. Cette approche métrologique

nous a permis de proposer une méthode simple et objective d'évaluation des aptitudes olfactives des individus à partir de laquelle quelques résultats préliminaires ont été obtenus.

Cette méthode sera mise à profit dans le cadre de la poursuite de cette étude qui servira de base à la future thèse de doctorat vétérinaire d'Emilie Boulard (travail en cours).

Bibliographie

- ABNEY, D. (2009). *Canine Tracking Guide: Training the all-purpose tracker*. i-5 Publishing, Irvine.
- ACHE B.W., YOUNG J.M. (2005). Olfaction : diverse species, conserved principles. *Neuron* 48 (3) : 417-430.
- ADAMKIEWICZ E., JEZERSKI T., WALCZAK M., GORECKA-BRUZDA A., SOBCZYNSKA M., PROKOPCZYK M. et al. (2013). Traits of drug and explosives detection in dogs of two breeds as evaluated by their handlers and trainers. *Anim Sci Pap Rep* 31 : 205-217.
- AIME P., DUCHAMP-VIRET P., CHAPUT M.A., SAVIGNER A., MAHFOUZ M., JULLIARD A.K. (2007). Fasting increases and satiation decreases olfactory detection for neutral odor in rats. *Behav Brain Res* 179 (2) : 258-264.
- ALHAIDARI Z., OLIVRY T., et ORTONNE J.P. (1999). Melanocytogenesis and melanogenesis: genetic regulation and comparative clinical diseases. *Vet. Dermatol.*, vol. 10, no 1, p. 3-16
- ALTOM E.K., DAVENPORT G.M., MYERS L.J., CUMMINS K.A. (2003). Effect of dietary fat source and exercise on odorant-detecting ability of canine athletes. *Res Vet Sci* 75 (2) : 149-155.
- ANDERSON H., HENRICSON B., et LUNDQUIST P. (1968). Genetic hearing impairment in the Dalmatian dog. An audiometric, genetic and morphologic study in 53 dogs. *Acta Otolaryngol*, no Suppl 232, p. 1-34
- ANGLE C.T., WAKSHLAG J.J., GILLETTE R.L., STEURY T., HANEY P., BARRETT J. et al. (2014). The effects of exercise and diet on olfactory capability in detection dogs. *J Nutr Sci* 3 (44) : 1-5.
- AUGUST J.R. et SIMS M.H. (1988). Electrodiagnostic Evaluation of Auditory Function. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.*, vol. 18, no 4, p. 913-944
- AYDIN K. et coll. (2007). Increased gray matter density in the parietal cortex of mathematicians. *Am. J. Neuroradiol.*, 28, 1859-64.
- BARONE R. (1984). *Anatomie comparée des mammifères domestiques Tome 1. Ostéologie I*. Paris, Editions Vigot, 79-321.
- BARONE R. (1997). *Anatomie comparée des mammifères domestiques Tome 3. Splanchnologie I. Appareil digestif et appareil respiratoire*. Paris, Editions Vigot, 592-644.
- BARONE R. (2004). *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 6. Neurologie I. Système nerveux central*. Paris, Editions Vigot, 433-477.

- BAUER M. et LEMO N. (2008). The origin and evolution of Dalmatian and relation with other Croatian native breeds of dog. *Rev. Médecine Vét.*, vol. 159, no 12, p. 618–623
- BEEBE S.C., HOWELL T.J., BENNETT P.C. (2016). Using scent detection dogs in conservation settings: A review of scientific literature regarding their selection. *Frontiers. Vet. Sci.* 3, 1-13.
- BHANDAWAT V., MAIMON G., DICKINSON MH., WILSON RI. (2013). Olfactory modulation of flight in *Drosophila* is sensitive, selective and rapid. *J Exp Biol.* 1 nov 2010;213 (Pt 21) :3625-35.
- BONFILS, P. (2016). Approche diagnostique, pronostique et thérapeutique des troubles olfactifs liés à l'âge. *Bull. Acad. Natle Méd.*, 200, n° 7, 1433-1448, séance du 11 octobre 2016
- BRANIŠ M. et BURDA H. (1985). Inner ear structure in the deaf and normally hearing Dalmatian dog. *J. Comp. Pathol.*, vol. 95, no 2, p. 295-299
- BRENNAN P. A., ZUFALL F. (2006). Pheromonal communication in vertebrates. *Nature* 444, 308-315.
- BROOKS S.E., OI F.M. et KOEHLER P.G. (2003). Ability of canine termite detectors to locate live termites and discriminate them from non-termite material. *Journal of Economic Entomology* 96: 1259-1266.
- BROWN S.W. et STRONG V. (2001). The use of seizure-alert dogs. *Seizure* 10: 39-41.
- BROWNE C., STAFFORD K., FORDHAM R. (2006). The use of scent-detection dogs. *Irish Veterinary Journal* 59(2): 97-104.
- BROWNELL D.A., MARSOLAIS M. (2002). The Brownell-Marsolais Scale: A proposal for the qualitative evaluation of SAR/disaster K9 Candidates. *Adv. Rescue. Technol.* 5, 57-67.
- BUCK L., AXEL R. (1991). A novel multigene family may encode odorant receptors : a molecular basis for odor recognition. *Cell* 65 (1) : 175-187.
- BUSH W.D. et SIMON J.D. (2007). Quantification of Ca²⁺ binding to melanin supports the hypothesis that melanosomes serve a functional role in regulating calcium homeostasis. *Pigment Cell Res.*, vol. 20, no 2, p. 134-139
- CAMPBELL N.A. et REECE J.B. (2005). *Biologie* 7e édition.
- CAUZINILLE L. (1997). La mesure des potentiels évoqués auditifs du tronc cérébral: une methode objective pour tester l'audition. *Point Vét.*, vol. 28, no 181, p. 37-40

CLUTTON-BROCK J. (1995). *Origins of the Dog: domestication and early history. The domestic dog: its evolution, behaviour and interactions with people.* 7 – 20, ed. J. Serpell. Cambridge University Press, NY.

COLLIN B. (2003). *L'anatomie du chien.* Derouaux Ordina; 572 p.

COMBRE M. (2006). *L'olfaction chez le chien et son utilisation en odorologie.* Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 144p.

COPPENS A.G., KISS R., HEIZMANN C.W., DELTENRE P. et PONCELET L. (2001). An original inner ear neuroepithelial degeneration in a deaf Rottweiler puppy. *Hear. Res.*, vol. 161, no 1-2, p. 65-71

COPPENS A.G., STEINBERG S.A., et PONCELET L. (2003). Inner Ear Morphology in a Bilaterally Deaf Dogo Argentino Pup. *J. Comp. Pathol.*, vol. 128, no 1, p. 67-70

COPPENS A.G., GILBERT-GREGORY S., STEINBERG S.A., HEIZMANN C., et PONCELET L. (2005). Inner ear histopathology in “nervous Pointer dogs” with severe hearing loss. *Hear. Res.*, vol. 200, no 1-2, p. 51-62

COREN S. (1994). *The Intelligence of Dogs: How intelligent is your dog.* Headline Book Publishing, London.

COSTE M. (2015). *De l'utilité du chien dans la recherche de noyés.* Thèse de doctorat vétérinaire. Paris : Université Paris-Est Créteil Val de Marne, 129p.

COX C. (2002). Investigation of hearing loss in dogs. *In Pract.*, vol. 24, no 9, p. 494-501

CRAVEN B., PATERSON E., SETTLES G. (2010). The fluid dynamics of canine olfaction: unique basal nasal airflow patterns as an explanation of macrosmia. *J R Soc Interface* 7 : 933-943.

DEHASSE J. (2009). *Tout sur la psychologie du chien.* Odile Jacob ; 528 p.

DUCHAMP-VIRET P., ROSPARS J-P. (2013). Chapitre 9 : Codage de l'information par les neurones olfactifs. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications.* Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae; p. 93 à 108.

EDNEY A. (1993). Dogs and human epilepsy. *Veterinary Record* 132: 337-338.

EVANS H.E., DE LAHUNRA A. (2012). *Miller's Anatomy of the dog.* 4th ed. St Louis, Saunders-Elsevier, 850p, 63-64 ; 191-210 ; 338-344.

- EZEH P.I., MYERS L.J., HANRAHAN L.A., KEMPPAINEN R.J., CUMMINS K.A. (1992). Effects of steroids on the olfactory function of the dog. *Physiol Behav* 51 (6) : 1183-1187.
- FEDY A. et coll. (2002). Longitudinal study of motor recovery after stroke. *Stroke*, vol. 33, 1610-1617.
- FERRARA M.L. et HALNAN C.R. (1983). Congenital structural brain defects in the deaf dalmatian. *Vet. Rec.*, vol. 112, no 15, p. 344-346
- FERRY B. (2014). The orexinergic system influences conditioned odor aversion learning in the rat: A theory on the processes and hypothesis on the circuit involved. *Frontiers in behavioral neuroscience*. 8. 164. 10.3389/fnbeh.2014.00164.
- FERRY B. et DUCHAMP-VIRET P. (2014). The orexin component of fasting triggers memory processes underlying conditioned food selection in the rat. *Learning & memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)*, 21(4), 185–189. <https://doi.org/10.1101/lm.033688>.113
- FRANTZ L.A.F., MULLIN V.E., PIONNIER-CAPITAN M., LEBRASSEUR O., OLLIVIER M., PERRI A. et al. (2016). Genomic and archaeological evidence suggest a dual origin of domestic dogs. *Science*, 352(6290), 1228-1231
- FROWEN D. (1999). *L'encyclopédie pratique du chien*. (Iain Mac Grogor).
- GALIBERT F., AZZOUZI N., QUIGNON P., CHAUDIEU G. (2016). The genetics of canine olfaction, *Journal of Vet Behav* 16 : 86-93
- GAUDRON C. (2015). Variabilité phénotypique et surdité congénitale chez le dalmatien. Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 153p.
- GAZIT I., TERKEL J. (2003). Explosives detection by sniffer dogs following strenuous physical activity. *Appl Anim Behav Sci* 81 (2) : 149-161.
- GIFFROY J-M. (2007). Le chien: un loup domestiqué pour communiquer avec l'homme. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*. 2007. Vol. 160, n° 5, pp. 343-348. DOI 10.4267/2042/47905.
- GLUSMAN G., YANAI I., RUBIN I., LANCET D. (2001). The complete human olfactory subgenome. *Genome Res* 11 : 685-702.
- GOLDBERG MARCIA B., LANGMAN V.A., RICHARD TAYLOR C. (1981). Panting in dogs : Paths of air flow in response to heat and exercise. *Respiration Physiology* 43, 327-338.

GONÇALVES R., FREEMAN J., PENDERIS J. (2008). The Use of Contralateral Masking Noise in the Detection of Unilateral Deafness in Dalmatian Puppies. *J. Vet. Intern. Med.*, vol. 22, no 1, p.234-237

GONÇALVES R., MCBREARTY A., PRATOLA L., CALVO G., ANDERSON T.J. et PENDERIS J. (2012). Clinical evaluation of cochlear hearing status in dogs using evoked otoacoustic emissions. *J. Small Anim. Pract.*, vol. 53, no 6, p. 344-351

GOTTESBERGE A.M. (1988). Physiology and pathophysiology of inner ear melanin. *Pigment Cell Res.*, vol. 1, no 4, p. 238–249

GOUX E. (2019). L'olfaction canine dans le diagnostic de cancer : exemple de dépistage de cancer du sein. Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 136p.

GRAHAM L.T., GOSLING S.D. (2009). Temperament and personality in working dogs. Helton, W.S. (Ed.), *Canine Ergonomics: The Science of Working Dogs*. CRC Press, London, pp. 63-81.

GRANDJEAN D., JULIEN C., GALLET C., et BLONDOT M. (2022). Détection olfactive canine de la COVID-19. Le chien au service de la santé humaine. *Médecine de Catastrophe - Urgences Collectives*. 1 mars 2022. Vol. 6, n° 1, pp. 59-63. DOI 10.1016/j.pxur.2021.12.003.

GROSMAITRE X. (2013). Chapitre 17 : L'organe septal de Maser et le ganglion de Grueneberg. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications*. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae ; p. 207 à 214.

HARVEY L.M. et HARVEY J.W. (2003). Reliability of bloodhounds in criminal investigations. *Journal of Forensic Sciences* 48: 811-816.

HIRAI T., KOJIMA S., SHIMADA A., UMEMURA T., SAKAI M., ITAKURA C. (1996). Age-related changes in the olfactory system of dogs. *Neuropathol Appl Neurobiol*. déc 1996;22(6):531-9

HIRAIDE F. et PAPARELLA M.M. (1988). Histopathology of the Temporal Bones of Deaf Dogs. *Auris. Nasus. Larynx*, vol. 15, no 2, p. 97-104

HOLLEY A. (1975). La perception des odeurs. *La recherche*, 58 (6), 629-639.

HOLLEY A. (2006). Système olfactif et neurobiologie. *Terrain Anthropol Sci Hum*. 1 sept 2006 ; (47):107-22.

HOLLEY A., ANTON S., ROSPARS J-P. (2013). Chapitre 6 : Anatomie globale et fonctionnelle des systèmes olfactifs des Vertébrés et Invertébrés. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications*. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae ; p. 49 à 60.

HOLLIDAY T. et TE SELLE M.E. (1985). Brain stem auditory-evoked potentials of dogs: wave forms and effects of recording electrode positions. *Am. J. Vet. Res.*, vol. 46, no 4, p. 845-51

HOSHINO T., MIZUTA K., GAO J., ARAKI S., ARAKI K., TAKESHITA T., WUR. et MORITA H. (2000). Cochlear findings in the white spotting (Ws) rat. *Hear. Res.*, vol. 140, no 1-2, p. 145-156

HURT A., SMITH D.A. (2009). Conservation dogs. In: Helton, W.S. (Ed.), *Canine Ergonomics: The Science of Working Dogs*. CRC Press, London, 175-194.

JACQUET E. (2003). Contribution à l'étude de la sélection et de la formation des chiens et maitres de chien de la gendarmerie nationale. Thèse de doctorat vétérinaire. Toulouse : Université Paul Sabatier, 161p.

JACQUIN-JOLY E., LUCAS P., PAJOT-AUGY E., SANZ G. (2013). Chapitre 8 : Réception et transduction du signal olfactif. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications*. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae; p. 75 à 92.

JAMIESON L.T.J., BAXTER G.S., MURRAY P.J. (2017). Identifying suitable detection dogs. *Applied Animal Behaviour Science* 195 : 1-7.

JENKINS E.K., LEE-FOWLER T.M., ANGLE T.C., BEHREND E.N., MOORE G.E. (2016). Effects of oral administration of metronidazole and doxycycline on olfactory capabilities of explosives detection dogs. *Am J Vet Res* 77 : 906-912.

JENKINS E.K., DE CHANT M.T., PERRY E.B. (2018). When the Nose Doesn't Know: Canine Olfactory Function Associated With Health, Management, and Potential Links to Microbiota. *Front Vet Sci* 5 : 56.

JIN Z., UHLEN I., WEI-JIA K. et MAO-LI D. (2009). Cochlear homeostasis and its role in genetic deafness. *J. Otol.*, vol. 4, no 1, p. 15-22

JOHNSSON L.G., ROUSE R.C., HAWKINS Jr J. E., KINGSLEY T.C. et WRIGHT C. G. (1981). Hereditary deafness with hydrops and anomalous calcium phosphate deposits. *Am. J. Otolaryngol.*, vol.2, no 4, p. 284-298

JONES DT., REED RR. (1989). Golf: an olfactory neuron specific-G protein involved in odorant signal transduction. *Science*. 19 mai 1989; 244(4906):790-5.

JONES K.E., DASHFIELD K., DOWNEND A.B., OTTO C.M. (2004). Search-and-rescue dogs : an overview for veterinarians. *J Am Vet Med Assoc* 225 (6) : 854-860.

- JULLARD A.K., CHAPUT M.A., APELBAUM A., AIME P., MAHFOUZ M., DUCHAMP-VIRET P. (2007). Changes in rat olfactory detection performance induced by orexin and leptin mimicking fasting and satiation. *Behav Brain Res* 183 (2) : 123-129.
- KAHN A. (2007). *L'homme, ce roseau pensant*, Paris, Odile Jacob.
- KAWASAKI Y. et INADA S. (1994). Peaks of brainstem auditory evoked potentials in dogs. *Vet. Res. Commun.*, vol. 18, no 5, p. 383-396
- KAY R., PALMER A. et TAYLOR P. (1984). Hearing in the dog as assessed by auditory brainstem evoked potentials. *Vet Rec*, vol. 114, no 4, p. 81-4
- KEMPER D.L., SCHEIFELE P.M. et CLARK J.G. (2013). Canine brainstem auditory evoked responses are not clinically impacted by head size or breed. *Physiol. Behav.*, vol. 110-111, p. 190-197
- KEREPESI A., JONSSON G.K., MIKLOSI A., TOPAL J., CSANYI V., MAGNUSSON M.S. (2005). Detection of temporal patterns in dog-human interaction, *Behav Process* 70 (1) : 69-79.
- KLEIN B.G. (2013). *Cunningham's Textbook of Veterinary Physiology*. Elsevier Health Sciences.
- KROELY A. (2011). *L'olfaction chez le chien de sauvetage : conséquences pratiques chez les chiens de recherche en décombre et en avalanches*. Thèse de doctorat vétérinaire. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 133p.
- KURZ M.E., BILLARD M., RETTIG M., AUGUSTINIAK J., LANGE J., LARSEN M., et al. (1994). Evaluation of canines for accelerant detection at fire scenes. *Journal of Forensic Sciences* 39: 1528-1536.
- LEFEBVRE H.P. (1993). Exploration fonctionnelle de l'audition chez le chien: possibilités actuelles. *Prat Med Chir Anim Comp*, no 28, p. 105-118
- LEGENDRE K., PETIT C. et EL-AMRAOUI A. (2009). La cellule ciliée externe de la cochlée des mammifères - Un amplificateur aux propriétés exceptionnelles. *médecine/sciences*. 1 février 2009. Vol. 25, n° 2, pp. 117-120. DOI 10.1051/medsci/2009252117.
- LYNCH J.W., BARRY P.H. (1989). Action potentials initiated by single channels opening in a small neuron (rat olfactory receptor), *Biophys J* 55 (4) : 755-768.
- MAEJIMA M., INOUE-MURAYAMA M., TONOSAKI K., MATSUURA N., KATO S., SAITO Y., WEISS A., MURAYAMA Y., ITO S. (2007). Traits and genotypes may predict the successful training of drug detection dogs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 107, 287-298.

- MAÏBECHE M., HEYDEL J.-M., LE BON A.-M., GOLEBIEWSKI J., BRIAND L. (2013). Chapitre 7 : Périréception et protéines porteuses. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications*. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae; 2013. p. 61 à 74.
- MAIR I.W. (1976). Hereditary deafness in the dalmatian dog. *Arch. Otorhinolaryngol.*, vol. 212, no 1, p. 1-14, févr. 1976.
- MAGUIRE E.A., GADIAN D.G, FRITH C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc. Natl Acad. Sci usa*, 97, 4398-4403.
- MALNIC B., GODFREY P.A., BUCK L.B. (2004). The human olfactory receptor gene family. *Proc Natl Acad Sci USA* 101 (8) : 2584-2589.
- MARITI C., RICCI E., CARLONE B., MOORE J.L., SIGHIERI C., GAZZANO A. (2013). Dog attachment to man: a comparison between pet and working dogs, *J Vet Behav* 8 (3) : 135-145.
- MARSHALL-PESCINI S., PASSALACQUA C., BARNARD S., VALSECCHI P., PRATO-PREVIDE E. (2009). Agility and search and rescue training differently affects pet dogs' behaviour in socio-cognitive tasks. *Behav. Process.* 81, 416-422.
- McGARRITY M.E., SINN D.L., THOMAS S.G., MARTI C.N., GOSLING S.D. (2016). Comparing the predictive validity of behavioural codings and behavioural ratings in a working-dog breeding program. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 179, 82-94.
- MEIERHENRICH U.J., GOLEBIEWSKI J., FERNANDEZ X., CABROL-BASS D. (2005). De la molécule à l'odeur : les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction, *Actualité chimique* 289 : 29-40.
- MENINI A., PICCO C., FIRESTEIN S. (1995). Quantal-like current fluctuations induced by odorants in olfactory receptor cells, *Nature* 373 (6513) : 435-437.
- MINHINNICK S., PAPET L.E., STEPHENSON C.M., STEPHENSON M.R. (2016). Training fundamentals and the selection of dogs and personnel for detection work, in: Ensminger, J., Jezierski, T., Papet, L.E., (Eds.), *Canine Olfaction Science and Law*. CRC Press, London, pp. 155-171.
- MOULTON D.G. (1960). Studies in olfactory acuity. 5. The comparative olfactory sensitivity of pigmented and albino rats. *Anim Behav* 8 (3-4) : 129-133.
- MYERS L.J., REDDING R.W. et WILSON S. (1985). Reference values of the brainstem auditory evoked response of methoxyflurane anesthetized and unanesthetized dogs. *Vet. Res. Commun.*, vol. 9, no 4, p. 289-294

- NIPARKO J.K. et FINGER P.A. (1997). Cochlear nucleus cell size changes in the dalmatian: Model of congenital deafness. *Otolaryngol. Head Neck Surg.*, vol. 117, no 3, p. 229-235
- NORES J.M., BIACABE B., BONFILS P. (2000). Troubles olfactifs et pathologie générale : analyse et revue de la littérature. *Rev Med. Interne* 21 (1) : 95-104.
- PAGEAT P. (1997). La communication chimique dans l'univers des carnivores domestiques. *Le Point Vétérinaire*, 28, 181, 1055-1063.
- PONCELET L.C., COPPENS A.G. et DELTENRE P.F. (2002). Audiograms Estimated from Brainstem Tone- Evoked Potentials in Dogs from 10 Days to 1.5 Months of Age. *J. Vet. Intern. Med.*, vol. 16, no 6, p. 674-679
- PORTEAU C. (2018). Les capacités olfactives des chiens ouvrent de nouvelles perspectives dans le dépistage du cancer. Thèse de doctorat en pharmacie. Nantes : Université de Nantes, UFR Sciences pharmaceutiques et biologiques, 224p.
- PRATO-PREVIDE E., MARSHALL-PESCINI S., VALSECCHI P. (2008). Is your choice my choice? The owners' effect on pet dogs' (*Canis lupus familiaris*) performance in a food choice task. *Anim. Cogn.* 11, 167-174.
- PRICE E.R. et FISHER D.E. (2001). Sensorineural deafness and pigmentation genes: melanocytes and the *Mitf* transcriptional network. *Neuron*, vol. 30, no 1, p. 15–18
- PUJOL R., LENOIR M., et G. REBILLARD G. Audition - Oreille - Cochlée. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cochlea.eu>. [Consulté le: 08/09/2022].
- QUIGNON P., KIRKNESS E., CADIEU E., TOULEIMAT N., GUYON R., RENIER C. et al. (2003). Comparison of the canine and human olfactory receptor gene repertoires. *Genome Biol* 4 (12) : R80.
- QUIGNON P., GIRAUD M., RIMBAULT M., LAVIGNE P., TACHER S., MORIN E. et al. (2005). The dog and rat olfactory receptor repertoires. *Genome Biol.* 6 (10) : R83.
- QUIGNON P., RIMBAULT M., ROBIN S., GALIBERT F. (2012). Genetics of canine olfaction and receptor diversity. *Mamm Genome* 23 (1-2) : 132-143.
- REBMANN A., DAVID E., SORG M.H.H. (2000). *Cadaver Dog Handbook : Forensic Training and Tactics for the Recovery of Human Remains*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 228 pages.
- REED S.E., BIDLACK A.L., HURT A., GETZ W.M. (2011). Detection distance and environmental factors in conservation detection dog surveys. *J. Wildl. Manag.* 75, 243-251.

RODRIGUEZ I. (2013). Chapitre 16 : Le système voméronasal. Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae; p. 195 à 206.

ROONEY N.J., BRADSHAW J.W.S. (2004). Breed and sex differences in the behavioural attributes of specialist search dogs – a questionnaire survey of trainers and handlers. *Appl Anim Behav Sci* 86 (1-2) : 123-135.

ROQUEPLO C. (2003). Influence du port d'un collier antiparasitaire contenant de la deltaméthrine sur les performances olfactives du chien. Paris : Université Paris-Est Créteil Val de Marne, 178p.

ROSE S. (2006). *The Future of the Brain*, Oxford University Press.

ROSELL F. (2016). Chapitre 2 : Le flair. L'incroyable odorat du chien, un sens extraordinaire au service de l'homme. Ulmer ; p. 37 à 49.

ROUQUIER S., GIORGI D. (2007). Olfactory receptor gene repertoires in mammals. *Mutat Res* 616 (1-2) : 95-102.

ROUSE R.C., JOHNSON L.G., WRIGHT C.G. et HAWKINS J.E. (1984). Abnormal Otoconia and Calcification in the Labyrinths of Deaf Dalmatian Dogs. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)*, vol. 98, no 1-2, p. 61-71

SAMPAIO A.L.L., PAINE E., SCHACHERN P.A., SUTHERLAND C., CUREOGLU S., OLIVIEIRA C.A.C.P. et PAPARELLA M.M. (2010). Histopathological morphometric study of cochleosaccular dysplasia in Dalmatian dogs. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.*, vol. 74, no 8, p. 934-938

SCHROTT A. et SPOENDLIN H. (1987). Pigment anomaly-associated inner ear deafness. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)*, vol. 103, no 5-6, p. 451-457

SETTLE R.H., SOMMERVILLE B.A., MCCORMICK J. et BROOM D.M. (1994). Human scent matching using specially trained dogs. *Animal Behaviour* 48: 1443-1448.

SETTLES G., KESTER D., DOBSON-DREIBELBIS L. (2003). The external aerodynamics of sniffing. In Barth, F., Humphrey, J., and Secomb, T. (Eds), *Sensors and Sensing in Biology and Engineering*, New York/Springer, 323-355.

SHELTON S.B., STOCKARD-POPE J.E., CHRISMAN C.L., NICHOLS G. et SHEPHERD D. (1993). Brain stem auditory-evoked responses to clicks and tone bursts in notched noise in Dalmatian puppies. *Prog. Vet. Neurol.*, vol. 4, p. 31-36

SHIU J.N., MUNRO K.J. et COX C.L. (1997). Normative auditory brainstem response data for hearing threshold and neuro-otological diagnosis in the dog. *J. Small Anim. Pract.*, vol. 38, no 3, p. 103-107

SHYKIND B.M., ROHANI S.C., O'DONNELL S., NEMES A., MENDELSON M., SUN Y. et al. (2004). Gene switching and the stability of odorant receptor gene choice, *Cell* 117 (6) : 801-815.

SIMS M.H. et MOORE R. (1984). Auditory-evoked response in the clinically normal dog: early latency components. *Am J Vet Res*, vol. 45, no 10, p. 2019-27

SINISCALCHI M., SASSO R., PEPE A.M., DIMATTEO S., VALLORTIGARA G., QUARANTA A. (2011). Sniffing with the right nostril : lateralization of response to odour stimuli by dogs. *Animal behavior* 82 (2) : 399-404.

SINISCALCHI M., D'INGEO S., QUARANTA A. (2016). The dog nose "KNOWS" fear : asymmetric nostril use during sniffing at canine and human emotional stimuli. *Behavioural Brain Research* 304 : 34-41.

SINISCALCHI M., D'INGEO S., QUARANTA A. (2017). Lateralized functions in the dog brain. *Symmetry* 9 (5) : 71.

SMITH D.A., RALLS K., HURT A., ADAMS B., PARKER M., DAVENPORT B., SMITH M.C., MALDONADO J.E. (2003). Detection and accuracy rates of dogs trained to find scats of San Joaquin kit foxes (*Vulpes macrotis mutica*). *Anim. Conserv.* 6, 339-346.

SONODA H., KOHNOE S., YAMAZATO T., SATOH Y., MORIZONO G., SHIKATA K. et al. (2011). Colorectal cancer screening with odour material by canine scent detection. *Gut* 60(6): 814-819.

STEEL K.P., BARKWAY C. et BOCK G.R. (1987). Strial dysfunction in mice with cochleo-saccular abnormalities. *Hear. Res.*, vol. 27, no 1, p. 11-26

STEISS J.E. (1988). A survey of current techniques in veterinary electrodiagnostics: EEG, spinal evoked and brainstem auditory evoked potential recording. *Vet. Res. Commun.*, vol. 12, no 4-5, p. 281-288

STRAIN G.M. (1996). Aetiology, prevalence and diagnosis of deafness in dogs and cats. *Br. Vet. J.*, vol. 152, no 1, p. 17-36

STRAIN G.M., KEARNEY M.T., GIGNAC I.J., LEVESQUE D.C., NELSON H.J., TEDFORD B.L. et REMSEN L.G. (1992). Brainstem Auditory-Evoked Potential Assessment of Congenital Deafness

in Dalmatians: Associations With Phenotypic Markers. *J. Vet. Intern. Med.*, vol. 6, no 3, p.175-182

STRONG V., BROWN S.W. et WALKER R. (1999). Seizure-alert dogs - fact or fiction? *Seizure* 8: 62-65.

SVARTBERG K. (2002). Shyness-boldness predicts performance in working dogs. *Appl Anim Behav Sci* 79 (2) : 157-174.

TACHER S., QUIGNON P., RIMBAULT M., DREANO S., ANDRE C., GALIBERT A. (2005). Olfactory receptor sequence polymorphism within and between breeds of dogs. *Journal of Heredity* 96 (7) : 812-816.

TAKEUCHI S., ANDO M., et KAKIGI A. (2000). Mechanism Generating Endocochlear Potential : Role Played by Intermediate Cells in Stria Vascularis. *Biophys. J.*, vol. 79, no 5, p. 2572-2582

THOMAS-DANGUIN T., MAITREPIERRE E., SIGOILLOT M., BRIAND L., TROMELIN A. (2013). Chapitre 4 : Les molécules odorantes, sapides et trigéminales. *Odorat et goût: De la neurobiologie des sens chimiques aux applications*. Roland Salesse, Rémi Gervais. Editions Quae; p. 29 à 38.

TOBIAS K. et PATERSON S. (2012). *Anatomy of the Ear. Atlas of ear diseases of the dog and cat*, John Wiley & Sons, Ltd ; p. 1-21.

TOKURIKI M., MATSUNAMI K. et UZUKA Y. (1990). Relative effects of xylazine-atropine, xylazine- atropine-ketamine, and xylazine-atropine-pentobarbital combinations and time-course effects of the latter two combinations on brain stem auditory-evoked potentials in dogs. *Am. J. Vet. Res.*, vol. 51, no 1, p. 97-102

TORTORA G. et DERRICKSON B. (2007). *Principes d'anatomie et de physiologie*, 4e édition. De boeck.

TOUJ S. (2021). Sensibilité à la douleur, fonction olfactive et plasticité cérébrale chez un modèle murin de cécité congénitale. [en ligne]. [Consulté le 8 septembre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/25292>

VADUREL A., GOGNY M. (1997). L'odorat du chien : aspects physiologiques et facteurs de variation. *Le Point vétérinaire* 28 (181) : 21-26.

VAN DER VELDEN N.A. et RIJKSE C. (1976). A practicable method of making audiograms in dogs. *Appl. Anim. Ethol.*, vol. 2, no 4, p. 371-377

VAN ROOY D., ARNOTT E.R., EARLY J.B., MCGREEVY P., WADE C.M. (2014). Holding back the genes: limitations of research into canine behavioural genetics. *Canine. Genet. Epidemiol.* 1, 7-17.

VIDAL C. (2012). La plasticité cérébrale : une révolution en neurobiologie. *Spirale*. 2012. Vol. 63, n° 3, pp. 17-22. DOI 10.3917/spi.063.0017.

WALENSKY L.D., RUAT M., BAKIN R.E., BLACKSHAW S., RONNETT G.V., SNYDER S.H. (1998). Two novel odorant receptor families expressed in spermatids undergo 50-splicing. *J Biol Chem* 273 (16) : 9378-9387.

WEI Q., ZHANG H., GUO B. (2008). Histological structure difference of dog's olfactory bulb between different age and sex. *Zoological Research* 29 (5) : 537-545.

WELLS D.L., HEPPER P.G. (2003). Directional tracking in the domestic dog, *Canis familiaris*. *Appl Anim Behav Sci* 84 (4) : 297-305.

WILKES M.K. et PALMER A.C. (1992). Congenital deafness and vestibular deficit in the dobermann. *J. Small Anim. Pract.*, vol. 33, no 5, p. 218-224

ZOGRAPHOS M. (2017). Les chiens pour la détection d'affections médicales. Thèse de doctorat vétérinaire. Paris : Faculté de médecine de Créteil, 76p.

ZOU Z., HOROWITZ L.F., MONTMAYEUR J.P., SNAPPER S., BUCK L.B. (2001). Genetic tracing reveals a stereotyped sensory map in the olfactory cortex, *Nature* 414 (6860) : 173-179.

Annexe 1 : Dépliant utilisé lors de la phase de recrutement des chiens



ECOLE VETERINAIRE DE LYON

PARTICIPEZ A UN PROJET DE RECHERCHE

**Pour améliorer la connaissance des aptitudes olfactives
de la race et le confort de vie des chiens sourds.**



Compensation olfactive chez le chien sourd et mise en place d'une interface tactile pour le dressage d'orientation.

Quels sont les buts poursuivis par cette étude ?

Comparer les performances olfactives des chiens sourds par rapport aux chiens entendants et expérimenter leur adaptation à un harnais d'orientation tactile.

En quoi cela consiste pour mon chien ?

Un entraînement à la recherche d'odeur simple sous forme de jeu et la mise en évidence de ses seuils olfactifs de détection. Dans un second temps, à la mise en place d'un harnais tactile.

Pour quel(s) chien(s) ?

Les Dalmatiens, sourds ou entendants, de préférence âgés de moins de 8 ans et sans préférence de sexe.

Qu'est ce que j'y gagne ?

Des sacs de croquettes, un bilan biochimique gratuit pour mon chien et une belle expérience de jeu et de dressage avec lui.

Contact : clement.chalard@vetagro-sup.fr / 0760559830

Annexe 2 : Brochure explicative concernant les polymères utilisés pour
l'imprégnation des boudins de jeu

PEBAX[®]
BY ARKEMA

A POLYMER IN MOTION™

Pebax[®] elastomers



ACTIVE MOLECULES, FRAGRANCE CARRIER

SELECTIVE DIFFUSION

A common challenge in the active molecule and fragrance carrier industry is uniform distribution of fragrance and controlling the rate of release of the scent. The block amide-ether structure of Pebax® polymers can enable the absorption and controlled release of volatile molecules like fragrances, oils, and even insecticides at just the right rate over extended periods of time.

APPLICATIONS

- Air fresheners
- Aroma candles
- Fire-less candles
- Toilet cleaners
- Dishwasher tablets
- Scented/flavored dental floss
- Insect repellants
 - Wearable, non-wearable, livestock tags, pet collars

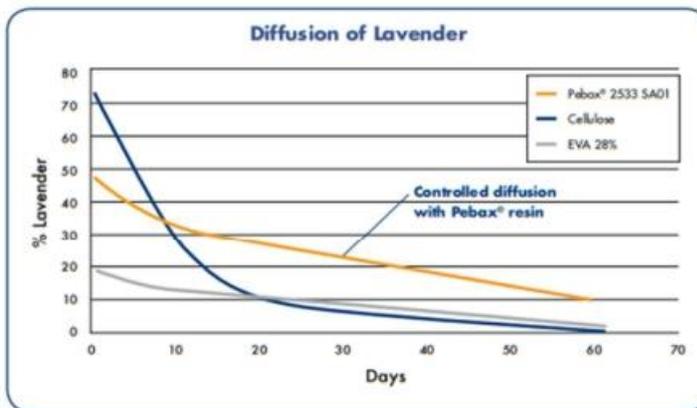
KEY BENEFITS

- Selective absorption
 - Polyether phase accepts many volatile molecules
 - Good absorption up to 50%
- Controlled release
 - Manipulate diffusion with wall thickness and temperature
 - Very good retention of fragrance properties
- Strong mechanical structure
 - Preserved by the polyamide block
 - Maintain the integrity of the finished part
- Low melting point
 - Molding and extrusion without degrading the fragrance substances
- Easy processing
 - Save time and money with more efficient processing

FOCUS – ABSORPTION AND DIFFUSION PROPERTIES

While materials like cellulose might absorb much more fragrance than Pebax® polymers at first, the scent is quickly diffused leaving the consumer with a potent wakeup call in the first days, but also the responsibility to replace their air freshener much more frequently. Pebax® 2533 SA01 exhibits a controlled release curve, providing a much better user experience.

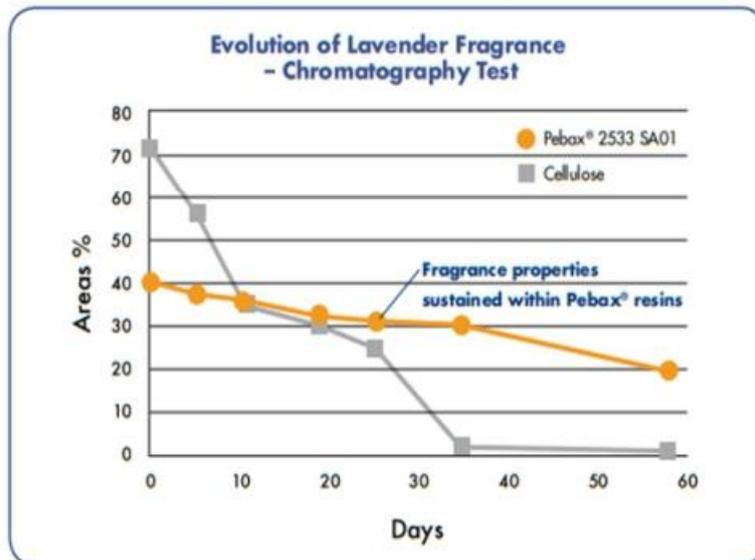
REFERENCE	PEBAX® 2533 SA01	CELLULOSE	EVA 28%
% LAVENDER ABSORPTION	50	70	20
% LAVENDER AFTER 60 DAYS	11	3	2





FOCUS – CONSISTENT SUBSTANCE RELEASE

Using chromatography methods, the evolution of a particular fragrance can be measured (answering the question, does the fragrance smell the same as it did 50 days ago?). The graph below illustrates how a cellulose carrier can affect the olfactory notes of perfumes like lavender. Contrary to a cellulose support, Pebax® 2533 SA01 allows for a consistent diffusion at a consistent rate, while maintaining the integrity of the scent.



PROCESSABILITY

Pebax® 2533 SA01 pellets can be impregnated before melt processing through dry-blending with the volatile substances. The low melting point (134°C) allows for injection molding and extrusion of the polymer without degradation of volatile substances. Standard conditions of processing and coloration may also be used, although lower processing temperatures are recommended to avoid modification of the volatile substances.

ESSAI DE MISE AU POINT D'UNE METHODE D'ETUDE DES PHENOMENES DE COMPENSATION OLFACTIVE CHEZ LE DALMATIEN SOURD

Auteur

CHALARD Clément

Résumé

Cette thèse est consacrée à la mise au point d'une méthode d'évaluation des capacités olfactives de chiens de race Dalmatien en vue de caractériser des phénomènes de compensation olfactive chez des sujets sourds bilatéraux par rapport à des sujets bi-entendants de la même race.

La première partie de synthèse bibliographique compile une étude du système olfactif canin, une étude comparée de la fonction auditive canine normale et de la surdité neurosensorielle du Dalmatien, et enfin l'étude des méthodes d'apprentissage des chiens de recherche olfactive utilisées par les équipes cynotechniques ainsi qu'un rapide point général sur les phénomènes de plasticité cérébrale et de compensation sensorielle.

Dans une deuxième partie, expérimentale, les résultats d'une étude métrologique visant à préciser les conditions matérielles et procédurales de tests d'évaluation des aptitudes olfactives de dalmatiens sourds et bi-entendants sont présentés. Bien que n'ayant pu être menée totalement à son terme, cette étude, permet de faire le point sur les difficultés rencontrées ainsi que sur les solutions possibles pour améliorer le protocole expérimental mis en œuvre. L'analyse des causes n'ayant pas permis de conduire le protocole à son terme, fait ensuite l'objet d'une discussion visant en particulier à proposer des modifications pratiques qui serviront de base pour la suite du travail initial, sujet d'une autre thèse de doctorat vétérinaire.

Mots-clés

Olfaction, Surdité, Chien, Compensation sensorielle, Essai

Jury

Président du jury : Professeur MION François
Directeur de thèse : Directrice de recherche FERRY Barbara
1^{er} Assesneur : Professeur MAGNIN Mathieu
2^{ème} Assesneur : Professeur BONNET Jeanne-Marie