

## Université de Liège

Faculté des Sciences – Département de Biologie, Écologie et Évolution

Laboratoire de Morphologie Fonctionnelle et Évolutive

Institut des Neurosciences Paris-Saclay

# Étude étho-acoustique d'un groupe social de cachalots (*Physeter macrocephalus*) résident de l'Île Maurice (Océan Indien)



Interaction en dyade entre une mère et son veau (Dos Calleux et Baptiste). *Source : Longitude 181*

Mémoire de fin d'études présenté par **Lara Berkenbaum** en vue de l'obtention du titre de  
Master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en  
biologie de la conservation : biodiversité et gestion.

Promoteur : Olivier Adam

Co-promoteur : Éric Parmentier

Année académique 2020-2021



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier la Marine Megafauna Conservation Organisation (MMCO), Longitude 181 et Label Bleu qui nous ont fourni les vidéos et le gouvernement mauricien ayant autorisé les missions. Ce travail n'aurait pas pu exister sans eux.

Un remerciement particulier à François Sarano qui m'a permis de participer à ce projet, à faire partie de l'équipe le temps de mon mémoire et qui est à l'origine des premiers contacts avec Olivier Adam, mon promoteur. François et son épouse Véronique ont été très disponibles pour nous, ont répondu à nos questions, nous ont transmis leur enthousiasme, leurs connaissances infinies et leurs anecdotes plus incroyables les unes que les autres.

Merci aussi du fond du cœur aux personnes de l'Île Maurice, Hugues Vitry, Lana Barteneva, Axel Preud'homme et Amar Ramkailahun, qui m'ont offert l'immense opportunité d'effectuer mon stage à Maurice et de pouvoir rencontrer plusieurs cachalots du groupe social que j'étudie. Ce fut une expérience des plus enrichissantes et l'occasion pour moi de voir de mes propres yeux comment le projet a été mis en place et se déroule au jour le jour.

Un grand merci à Camille Eyraud pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses conseils. Merci aux différents stagiaires (Aurélien, David, Marine, Salomé) qui nous ont aidés et m'ont permis d'apprendre sur moi-même. Une attention particulière à Lorrie, notre première stagiaire mais surtout à Marie Larivière, ma collègue du début à la fin de cette aventure.

Un grand merci à ma famille pour leur soutien sans faille et plus particulièrement à mon père, Philippe Berkenbaum sans qui je ne serais sans doute pas là où j'en suis, pour son aide tout au long de cette aventure, ses encouragements, ses conseils, ses contacts, son expérience.

Merci beaucoup à Eric Parmentier qui répondit présent quand c'était nécessaire, ses conseils, son expérience, ses critiques avisées.

Et par-dessus tout, mille mercis à Olivier Adam. Son aide, son soutien, sa disponibilité, son expérience, ses anecdotes, ses conseils, son enthousiasme à toute épreuve et l'opportunité qu'il m'a donnée de travailler à ses côtés pendant 6 mois et d'en apprendre autant en si peu de temps m'accompagneront tout au long de ma future carrière.

# Résumé

Université de Liège

Faculté des Sciences – Département de Biologie, Écologie et Évolution

Laboratoire de Morphologie Fonctionnelle et Évolutive

Institut des Neurosciences Paris-Saclay

## **Étude étho-acoustique d'un groupe social de cachalots (*Physeter macrocephalus*) résident de l'Île Maurice (Océan Indien)**

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du titre de Master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en biologie de la conservation : biodiversité et gestion

Étudiante : Lara Berkenbaum

Promoteur : Olivier Adam

Année académique 2020-2021

Co-promoteur : Éric Parmentier

L'objectif de cette recherche est de comprendre la dynamique et les comportements sociaux et acoustiques d'un groupe de cachalots résident de l'île Maurice, dans l'Océan Indien. Nous avons eu accès à un matériel unique en son genre : plus d'une centaine d'heures d'images vidéo prises dans l'eau par une équipe d'observateurs qui suit le groupe concerné depuis une dizaine d'années. La grande majorité des recherches effectuées jusqu'ici sur d'autres groupes l'ont été à partir d'observations effectuées hors de l'eau.

Nous avons cherché à déterminer si ce groupe d'une trentaine d'individus était constitué d'une ou plusieurs unités sociales, s'il était matrilineaire et si sa structure sociale se détermine en fonction des liens de parenté entre ses membres ou d'autres paramètres. Nous avons également procédé à l'analyse des comportements sociaux et acoustiques pour vérifier si certaines vocalises peuvent être associées à certains types d'interactions entre individus et s'il existait des caractéristiques propres à notre groupe.

L'objectif d'une telle recherche est de fournir des données pouvant être comparées à d'autres groupes évoluant dans des régions proches ou différentes, à des fins de protection et de conservation. Les cachalots sont une espèce vulnérable qui est encore peu étudiée à ce jour.

# Table des matières

## Remerciements

## Résumé

<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Le grand cachalot (Physeter macrocephalus) – généralités</i> .....	1
1.2. <i>Structure sociale et unité sociale</i> .....	2
1.3. <i>Interactions : comportements sociaux et acoustiques</i> .....	3
1.3.1. Comportements sociaux .....	5
1.3.2. Comportements acoustiques .....	6
1.4. <i>Collectes de données</i> .....	8
1.5. <i>Objectifs de l'étude et contenu du travail</i> .....	8
<b>2. Sujets, matériel et méthodes.....</b>	<b>9</b>
2.1. <i>Zone d'étude</i> .....	9
2.2. <i>Sujets d'étude</i> .....	11
2.2.1. Identification des individus .....	11
2.2.2. Composition du groupe social .....	13
2.2.3. Structure sociale .....	13
2.2.4. Classes d'âges.....	14
2.3. <i>Répertoire comportemental</i> .....	15
2.3.1. Comportements sociaux .....	16
2.3.2. Comportements acoustiques .....	18
2.4. <i>Base de données</i> .....	19
2.4.1. Sélection des données.....	19
2.4.2. Technique d'observation des comportements sociaux.....	20
2.4.3. Extraction et analyse des émission sonores .....	21
2.5. <i>Limites méthodologiques</i> .....	23
2.6. <i>Analyses statistiques</i> .....	25
2.7. <i>Hypothèses</i> .....	26

<b>3. Résultats et discussion .....</b>	<b>27</b>
3.1. <i>Structure sociale</i> .....	27
3.1.1. Jeunes et immatures.....	27
3.1.2. Sociogramme.....	29
3.1.3. Discussion .....	31
3.2. <i>Comportements sociaux et acoustiques</i> .....	33
3.2.1. Comportements sociaux .....	33
3.2.2. Comportements acoustiques .....	41
3.2.3. Discussion et limites.....	48
<b>4. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>51</b>
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>I</b>
<b>6. Annexes .....</b>	<b>V</b>
<i>Annexe 1. Glossaire</i> .....	<i>V</i>
<i>Annexe 2. Récapitulatif des statistiques</i> .....	<i>VIII</i>

## Table des figures

Figure 1.	Modèle « Bent-horn » de la génération des sons du cachalot.....	7
Figure 2.	Localisation de l'Île Maurice dans l'Océan Indien.....	10
Figure 3.	Fiche d'identification de l'individu Irène Gueule Tordue.....	12
Figure 4.	Arbre généalogique du groupe social étudié.....	14
Figure 5.	Représentation du début d'un buzz dans le logiciel Audacity.....	22
Figure 6.	Représentation, dans Audacity, d'une coda « 2+1+1+1+1+1 ».....	23
Figure 7.	Représentation, dans Audacity, d'un clic régulier appelé « 6R ».....	23
Figure 8.	Boîtes à moustache de la fréquence d'occurrence du comportement de tête – fente génitale (catégorie « contact ») en fonction des individus jeunes et immatures.....	27
Figure 9.	Boîtes à moustache de la fréquence d'occurrence du comportement de nage accompagnée (« déplacement ») en fonction des individus jeunes et immatures.....	28
Figure 10.	Sociogramme représentant les interactions entre individus du même groupe social.....	29
Figure 11.	Histogramme des fréquences d'occurrence des interactions entre individus en dyade ou en triade dans le groupe social étudié.....	34
Figure 12.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de rotation en fonction des classes d'âge.....	36
Figure 13.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence de la catégorie de contact en fonction des classes d'âges.....	37
Figure 14.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Latéral – Latéral et Tête – Corps en fonction des individus immatures et jeunes.....	38
Figure 15.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Latéral – Latéral et Tête – Corps en fonction du sexe des juvéniles.....	38
Figure 16.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Dos – Dos et Ventre – Latéral en fonction des individus immatures et jeunes.....	39
Figure 17.	Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Dos – Dos et Ventre – Latéral en fonction du sexe des juvéniles.....	39
Figure 18.	Représentation d'un miaulement d'une durée d'1 seconde, chevauché à d'autres structures de clics, sur Audacity.....	42
Figure 19.	Histogramme des fréquences d'occurrence des buzz en fonction des différentes catégories de comportements.....	43
Figure 20.	Diagramme en barres des structures de clics réguliers identifiées en fonction de leur nombre d'occurrences.....	44
Figure 21.	Diagramme en barres des structures de codas identifiées en fonction de leur nombre d'occurrence.....	45
Figure 22.	Diagramme en barres des nombres de clics par coda émise.....	46

## Table des tableaux

Tableau 1.	Caractéristiques des principaux types de clic des cachalots.....	7
Tableau 2.	Informations sur le groupe social étudié reprise du catalogue d'identification.....	13
Tableau 3.	Représentation des 3 tranches d'âge : jeunes (0 à 3 ans), immatures (4 à 9 ans) et femelles adultes (supérieur à 9 ans) avec le nom et le temps de présence des individus sur les 3 années d'observation.....	15
Tableau 4.	Répertoire des comportements sociaux.....	18
Tableau 5.	Répertoire des comportements acoustiques.....	19
Tableau 6.	Récapitulatif du total de vidéos analysés au niveau des comportements sociaux et acoustiques.....	20
Tableau 7.	Tableau des résidus du test $\text{Khi}^2$ effectué lors du croisement entre comportements et structures de codas.....	47

# 1. Introduction

## 1.1. Le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*) – généralités

Les cétacés font partie d'un taxon de la branche des mammifères, dont les espèces évoluent en milieu (sous-)marin. Ce taxon est divisé en 2 sous-groupes : les Odontocètes et les Mysticètes. L'espèce que nous étudions appartient au groupe des Odontocètes : le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*, Linnaeus, 1758), unique représentant de son genre *Physeter* (Goddard, 2015).

Ce cétacé à dents est un prédateur marin se trouvant au sommet de la chaîne alimentaire. C'est le plus grand représentant de son sous-groupe. Le dimorphisme sexuel est important : les femelles adultes mesurent environ 11 mètres de long alors que les mâles ont une taille d'environ 16 mètres (Christal et Whitehead, 2001), pour un poids allant de 15 à 45 tonnes (Würsig *et al.*, 2009). Leur alimentation est principalement constituée de céphalopodes qu'ils chassent à des profondeurs comprises entre 200 et 2000 m (Christal et Whitehead, 2001) selon le lieu et la présence de nourriture. Ils se déplacent généralement à une vitesse d'environ 4 km/h à l'intérieur de grands espaces, qui s'étendent sur environ 1000 km pour les femelles (Christal et Whitehead, 2001). Ils ont une durée de vie d'environ 70 ans. Les femelles mettent bas tous les 3 à 6 ans et peuvent s'occuper de leurs petits environ 10 ans.

Ces mammifères sont présents dans tous les océans et dans une grande majorité des mers du globe (Würsig *et al.*, 2009). Les populations de cachalots ont subi la chasse durant de nombreuses années, mais malgré l'arrêt de celle-ci depuis 1980, une étude de Gero et Whitehead (2016b) montre un déclin au rythme de 3,5% par an des populations des Caraïbes et des Galápagos, tandis qu'une autre étude récente indique que les populations les plus vulnérables sont les petites populations locales (Barteneva, 2020). Le grand cachalot est considéré par l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) comme « Espèce Vulnérable » dans la Liste Rouge des espèces menacées d'extinction (Taylor *et al.*, 2019 ; Sarano, 2019). Elle fait face à différentes menaces en lien direct avec les activités humaines, comme la pollution sonore liée au transport maritime, qui réduit la capacité des cachalots à se repérer et à chasser, ou la pollution plastique : les derniers échouages ont permis de découvrir des plastiques ingérés (BBC, 2021 ; Parker, 2018).

## 1.2. Structure sociale et unité sociale

« La structure sociale est une synthèse de la manière dont les individus interagissent les uns avec les autres. Idéalement, une description de la structure sociale d'une population saisit les nuances des différences individuelles dans le comportement social, mais résume aussi efficacement les actions des individus et leurs relations entre eux » (Whitehead, 2008).

D'après Konrad *et al.* (2018), la structure sociale des cachalots est basée sur de petites unités sociales (+/- 10 individus) susceptibles de s'unir pour former des groupes sociaux plus importants marqués par la coopération à long terme de leurs membres. Les unités constituent le niveau de base de la structure sociale des cachalots (Huijser *et al.*, 2019). Les membres de l'unité partagent une relation sociale stable et à long terme (Gero *et al.*, 2014a ; Whitehead, 2003) et peuvent être définis par certains auteurs comme des individus identifiés à moins de deux heures les uns des autres au cours d'au moins deux années différentes (Gero *et al.*, 2014a ; Konrad *et al.*, 2018).

On ne connaît pas bien le rôle que jouent les liens de parenté dans la formation de ces structures. Konrad *et al.* (2018) a pu démontrer que la composition de ces unités sociales et des préférences d'association est en partie liée à la parenté, mais ce n'est pas systématique.

Selon Christal et Whitehead (2001), la structure des unités de cachalots est partiellement matrilineaire et compte en moyenne environ 13 individus. Plus récemment, des recherches ont conclu que l'unité sociale des cachalots est majoritairement basée sur une structure matrilineaire puisqu'elle est habituellement constituée de femelles adultes (Konrad *et al.*, 2018) passant leur vie dans une même unité. Mais il existe des transferts occasionnels entre plusieurs unités ainsi que des possibles fissions et fusions des unités (Huijser *et al.*, 2019 ; Whitehead *et al.*, 2011), deux ou plusieurs unités formant alors un groupe social plus important, au moins temporairement. Durant certaines périodes de la journée, deux ou plusieurs unités stables peuvent s'associer formant alors un groupe constitué de femelles adultes et de juvéniles d'environ 20 à 30 animaux, se déplaçant de manière cohésive et entretenant des relations assez homogènes en leur sein (Christal et Whitehead, 2001 ; Konrad *et al.*, 2018 ; Whitehead, 2003). Dans une unité sociale généralement composée d'une dizaine de femelles et de juvéniles, les femelles sont souvent apparentées (Mesnick *et al.*, 2003 ; Gero *et al.*, 2014b), les membres se déplacent ensemble, se défendent et prennent soin de la progéniture des autres (Christal et Whitehead, 2001 ; Gero *et al.*, 2014a ; Whitehead *et al.*, 2011) et parcourent des zones couvrant généralement moins de 2000 km (Whitehead, 2008 ; Gero *et al.*, 2014a).

Les mâles, quant à eux, mènent une vie différente dès l'âge de 6-10 ans. Devenus grands, ils quittent leur unité natale, formant par la suite des groupes de célibataires éphémères qui sembleraient être moins organisés et moins solides (Whitehead, 2003 ; Whitehead *et al.*, 2011 ; Würsig *et al.*, 2009). Ensuite, vers l'âge de la maturité sexuelle (18-21ans), ils reviennent périodiquement dans l'habitat des unités sociales de femelles pour la reproduction, mais ne restent a priori que quelques heures ou moins (Whitehead *et al.*, 2011).

Toutes ces caractéristiques peuvent varier selon les régions et certains facteurs externes comme l'abondance de nourriture, la présence de prédateurs, etc. Des études dans le Pacifique tropical oriental (Whitehead, 2003) et plus récemment dans l'Atlantique, le Golfe du Mexique, l'archipel des Açores et la mer Méditerranée mettent en évidence une variation géographique substantielle au niveau de la structure sociale, des différences de comportements individuels (Gero *et al.*, 2014b ; Antunes *et al.*, 2011), des traditions comportementales spécifiques aux groupes (Rendell et Whitehead, 2003 ; Gero *et al.*, 2014b), ainsi que des différences au niveau social, vocal et comportemental (Whitehead *et al.*, 2011 ; Gero *et al.*, 2014a).

Il est donc important que les initiatives de conservation et de gestion des populations se concentrent principalement sur les unités sociales constituées majoritairement de femelles. Elles présentent une philopatrie régionale (Huijser *et al.*, 2019), nécessitent une compréhension approfondie de leur comportement et de leur structure sociale en fonction de leur région d'habitation (Gero *et al.*, 2014a).

### 1.3. Interactions : comportements sociaux et acoustiques

Chez les espèces sociales comme le grand cachalot, les interactions jouent un rôle important dans les comportements sociaux. Elles peuvent influencer et être influencées par la structure sociale et donc par les relations directes et indirectes entre individus (Hinde, 1976 ; Whitehead, 2008). Une interaction entre individus constitue un contact visuel, vocal, chimique ou physique (ou une combinaison de plusieurs de ces stimuli). D'après Whitehead (2008), l'interaction peut se définir comme « le comportement d'un animal affecté par la présence ou le comportement d'un autre ». Les interactions entre individus au sein d'un même groupe sont la base du cadre fixé par Hinde (1976) pour l'étude de la structure sociale, leur analyse est donc d'un intérêt primordial. Pour Whitehead (2008), il est préférable de commencer les analyses en se basant sur des interactions de type dyadiques (deux animaux impliqués), même s'il est possible d'identifier des interactions triadiques (trois animaux) ou d'ordre supérieur.

Toute interaction entre deux ou plusieurs individus implique la transmission entre eux d'informations susceptibles de modifier le comportement du ou des destinataires (Bradbury et Vehrencamp, 2000). Cela souligne le rôle important de la communication dans les études sur la structure sociale (Whitehead, 2008). La communication est un transfert d'informations entre un émetteur et un récepteur à plus ou moins longue distance. Elle est essentielle pour tout animal vivant en groupe, comme c'est le cas pour la majorité des oiseaux et des mammifères, car elle permet une compréhension entre individus et crée ainsi une réelle cohésion sociale (Bradbury et Vehrencamp, 2000). La communication acoustique est fortement utilisée lorsque la transmission d'informations visuelles est difficile ou impossible, par exemple chez les chauve-souris (*Myotis lucifugus* ; Melendez et Feng, 2010), en milieu marin ou dans les forêts tropicales, où la densité de végétation rend impossible les contacts visuels (Mathevon *et al.*, 2008). Elle tient compte des propriétés spécifiques de l'environnement.

Enfin, pour pouvoir interagir vocalement et/ou visuellement, il doit y avoir une forme d'association entre les individus. Cette association est interprétée comme étant « à portée de communication », en fonction de la proximité spatiale et, éventuellement, d'une mesure de l'état comportemental (Whitehead, 2008). Différents types d'associations peuvent être observés : familiale/non familiale, stable/ponctuelle, récurrente/aléatoire, etc.

La collecte des données sociales à des fins d'analyse de la structure sociale au travers des interactions entre les membres d'un groupe peut s'effectuer de plusieurs manières (Whitehead, 2008). L'enregistrement par des observateurs sur des feuilles de données, des enregistrements vocaux ou des photographies correspond à la collecte de base. A notre connaissance et à l'heure actuelle, toutes les études effectuées sur les cachalots, comme celles de Christal et Whitehead (2001), de Gero *et al.* (2014, 2016), de Huijser *et al.* (2019), etc. ont recouru à des observations visuelles extérieures, c'est-à-dire collectées à partir d'un bateau. Par exemple, l'étude de Gero *et al.* (2014b) se base sur des observations sonores effectuées à l'aide d'hydrophones et visuelles à partir de plateformes émergées. Or, du fait que les cachalots évoluent, au cours de leurs interactions sociales à la surface et aussi en sub-profondeur, que l'angle de vue et la visibilité de l'eau peut rendre difficiles les observations depuis la surface, cette méthode n'est pas finalement suffisante pour rendre compte de la variété des interactions entre les membres d'un groupe social et encore moins pour en interpréter le sens.

De plus, depuis un bateau, il est notamment difficile pour les observateurs de connaître le sexe et l'âge des individus puisqu'ils se basent uniquement sur leur taille, faute d'autres éléments visibles d'appréciation et que les cachalots évoluent très rarement sur le dos lorsqu'ils sont en surface. Les scientifiques ont alors défini trois classes d'âge/sexe en se basant principalement sur la taille des individus et sur les signaux acoustiques enregistrés : mâles matures, femelles adultes/immatures et veaux (de l'anglais « calf ») dépendants (Gero *et al.*, 2014a), mâles ou femelles. Le dimorphisme important qui caractérise les cachalots rend cependant difficile la différenciation des femelles adultes et des immatures mâles, de taille similaire. Or, comme le souligne Whitehead (2008), pour enrichir une analyse sociale, il est intéressant de classer les animaux selon certains de leurs attributs comme le sexe, l'âge, l'état physiologique, la matrilinearité, les gènes, le phénotype comportemental et l'unité sociale. Le cadre de Hinde (1976) postule par ailleurs qu'il est intéressant de généraliser des interactions entre deux individus aux interactions entre classes d'individus.

### 1.3.1. Comportements sociaux

Whitehead (2003), met en avant quatre grandes catégories reprenant les fonctions des nombreux comportements différents effectués par les cachalots. On y retrouve l'alimentation, la socialisation, la navigation et le repos. Le cachalot vit une grande partie de sa vie en groupe, c'est une espèce sociale qui peut consacrer jusqu'à 25% de son temps à un comportement de socialisation avec ses congénères (Goddard, 2015 ; Whitehead, 2003). Le temps de socialisation peut varier d'un jour à l'autre et se déroule à la surface ou à faible profondeur (sub-surface). Lorsqu'ils se regroupent en surface, l'éventail des possibilités de comportements qu'ils effectuent, aussi bien visuels qu'acoustiques, est important. Aussi, ce sont ces groupes matrilineaires qui sont le plus souvent étudiés, en particulier leur structure sociale stable et les différentes interactions entre individus. Les adultes femelles interagissent et s'occupent de l'éducation des juvéniles jusqu'à un âge compris entre 6 et 10 ans. Les interactions entre les différents membres du groupe permettent de renforcer certains liens sociaux, par exemple entre les jeunes et leurs nurses, qui peuvent les allaiter alors que ce n'est pas leur progéniture (Whitehead, 2003 ; Whitehead, 2008 ; Goddard, 2015). C'est en effet une spécificité de l'espèce : certaines femelles adultes prennent soin des veaux d'autres femelles en l'absence de celles-ci, par exemple lorsqu'elles sont parties chasser. La littérature parle alors de « gardiennes », « baby-sitters » ou « nurses ». Il peut même s'agir de soins allo-parentaux.

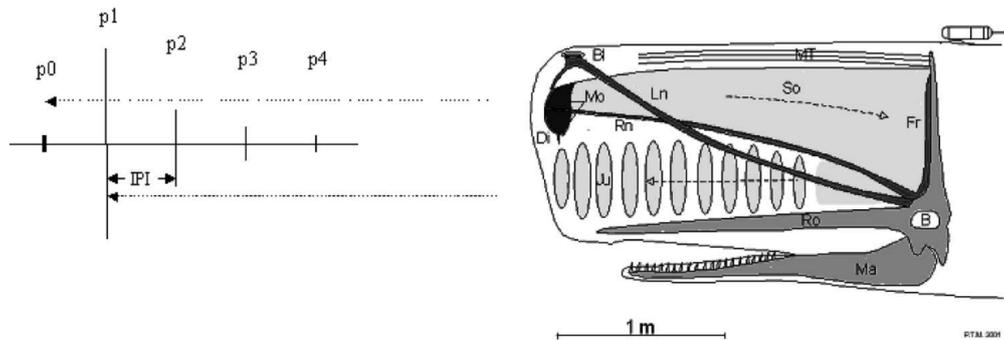
Les seuls comportements réellement décrits à l'heure actuelle dans la littérature concernent cependant les comportements aériens. Or, à la différence d'autres espèces d'Odontocètes, les comportements aériens (frappes de caudales ou pectorales, « breach » ...) sont très peu réalisés par les cachalots, en raison sans doute du coût énergétique que cela représente pour eux (Goddard, 2015 ; Whitehead, 2003).

Sur base des observations aériennes et acoustiques disponibles, Goddard (2015) estime que le comportement de socialisation des cachalots correspond à toutes les interactions directes ou indirectes accompagnées de vocalisations entre individus. Selon les observations, les cachalots peuvent adopter ce type de comportement autant le matin que l'après-midi. Il arrive qu'ils socialisent le matin en surface par exemple et plongent en profondeur l'après-midi pour s'alimenter (Goddard, 2015 ; Whitehead, 2003). La communication par l'émission de codas (cfr. infra) entre individus est une des caractéristiques de la socialisation, puisque la structure des codas donnerait des informations sur l'individu et sur son appartenance à un clan (Goddard, 2015 ; Rendell et Whitehead, 2003).

### 1.3.2. Comportements acoustiques

Les vocalises jouent un rôle important dans les comportements des cachalots. Chaque type de vocalise possède des caractéristiques propres et est utilisé dans des circonstances différentes permettant de définir leur fonction principale (Goddard, 2015).

Les vocalises des cachalots sont constituées de trains de clics produits avec leur complexe nasal hypertrophié (Møhl *et al.*, 2003 ; Zimmer *et al.*, 2005). Le processus de génération du son est basé sur la structure du clic mesurée directement devant ou derrière le cachalot, où des intervalles réguliers (IPI) sont trouvés entre les impulsions successives (Zimmer *et al.*, 2005). Chaque clic a une structure multi-pulsée, comme on peut le voir sur le schéma de la figure 1 (Goddard, 2015 ; Madsen, 2002a ; Zimmer *et al.*, 2005). Pour la plupart, les vocalises ont une structure similaire bien qu'elles aient des caractéristiques sonores différentes (fréquence, amplitude, etc.) (Goddard, 2015).



**Figure 1.** Modèle « Bent-horn » de la génération des sons du cachalot (Madsen, 2002a ; Zimmer *et al.*, 2005). L'ordonnée correspond à l'amplitude du son et l'abscisse au temps. B, cerveau ; BI, évent ; Di, sac aérien distal ; Fr, sac aérien frontal ; Ju, junk ; Ln, narine gauche ; Ma, mandibule ; Mo, lèvres de singe/ phonique ; MT, couche de muscles/tendons ; Rn, narine droite ; Ro, rostre ; So, organe du spermaceti.

Les pulses successifs constituant le clic correspondent aux p0, p1, p2, p3 et p4. Le pulse p0 est le pulse initial généralement de faible amplitude. Ensuite le p1 a la plus forte amplitude du fait de sa réflexion directive sur le sac distal et l'os frontal. Puis, pour les pulses suivants, on a une atténuation progressive de l'amplitude (Goddard, 2015 ; Madsen, 2002a ; Zimmer *et al.*, 2005). L'intervalle entre p1 et p2 correspond à l'intervalle inter-pulse (IPI) nominal (Goddard, 2015) qui semble constant pour un individu donné. L'IPI correspond donc à l'intervalle entre deux pulses successifs et l'intervalle inter-clic (ICI) est l'intervalle entre le dernier pulse d'un clic n et le premier pulse d'un clic n+1 (Goddard, 2015 ; Wahlberg *et al.*, 2001).

Les cachalots utilisent ces clics pour leurs activités vitales et sociales. Il existe différents types de clics que sont les buzz (ou « creaks »), les clics réguliers (« usual clicks » ou « regular clicks »), les clangs (ou clics lents) et les codas. Ces derniers correspondent à des séquences temporelles de clics qui sont émis au cours d'interactions sociales (Goddard, 2015 ; Møhl *et al.*, 2003 ; Oliveira *et al.*, 2016 ; Whitehead, 2003). D'autre part, il a été enregistré des miaulements (ou « trumpet call ») dont le rôle reste indéterminé à ce jour (cfr.infra).

Type de clic	Niveau sonore	Fréquence	ICI	Durée du clic	Durée d'un pulse	Portée	Fonction principale
Usual	230 dB	15 kHz	0,5-1 s	15-30 ms	0,1 ms	16 km	Écholocation
Creak	205 dB	15 kHz	0,05-0,1 s	0,1-5 ms	0,1 ms	6 km	Écholocation proche
Coda	180 dB	5 kHz	0,1-0,5 s	35 ms	0,5 ms	2 km	Communication
Lent	190 dB	0,5 kHz	5-8 s	30 ms	5 ms	60 km	Communication par les mâles

**Tableau 1.** Caractéristiques des principaux types de clic des cachalots (Madsen *et al.*, 2002a ; Whitehead, 2003)

## 1.4. Collectes de données

L'un des enjeux actuels de l'observation des cachalots porte sur la description des interactions entre individus, tant au niveau d'un groupe que d'une unité sociale, sur base de l'interprétation de comportements décrits à partir de données essentiellement acoustiques.

On l'a vu, la plupart des observations de cachalots à ce jour ont été réalisées visuellement hors de l'eau et à l'aide d'hydrophones immergés à partir d'un bateau, limitant les descriptions des interactions au cours de leurs relations sociales. D'autres possibilités existent pour recueillir des données sous-marines, comme le recours à des robots ou l'utilisation de caméras posées directement sur le cétacé, mais à ce jour, ces solutions ne sont pas optimales ni adaptées aux cachalots. En effet, les drones marins ne sont pas assez rapides et leur manœuvrabilité est limitée. De plus, le câble les reliant au bateau peut être une source de risque supplémentaire. Pour les caméras déployées sur les individus, la difficulté vient des pressions importantes lorsque les cachalots décident de plonger. Pour rendre cet outil intéressant pour décrire les interactions sociales, il faudrait alors au moins développer un système électronique qui libère la caméra automatiquement pour éviter qu'elle ne se trouve endommagée.

Depuis une dizaine d'années cependant, une équipe d'observateurs que nous évoquerons en détails dans le chapitre suivant (cfr. infra) a adopté une approche originale en suivant une population matrilineaire de cachalots vivant au large de l'Île Maurice, dans l'Océan Indien. Cette équipe a recours à des plongeurs experts pour réaliser des observations en surface et sous-surface. Notre étude est basée sur les observations collectées par cette équipe, constituant un jeu de données unique d'une centaine d'heures de vidéos et d'enregistrements sonores.

L'analyse systématique de ces données audiovisuelles nous a permis d'identifier les comportements sociaux et acoustiques d'un groupe social matrilineaire spécifique connu, observé depuis une dizaine d'années et résident des eaux mauriciennes. A l'aide des identifications visuelles, des analyses génétiques, acoustiques et éthologiques de cette population de l'océan Indien, il doit être possible à long terme de la dénombrer, d'en déduire la structure sociale et d'en mesurer la dynamique.

## 1.5. Objectifs de l'étude et contenu du travail

Notre étude vise à mieux comprendre la structure d'un groupe social de cachalots constitué de femelle et de juvéniles, et les interactions entre ses membres.

Elle a consisté concrètement à décrire les comportements au sein de paires et de triades d'individus membres de ce groupe évoluant au large de l'île Maurice.

L'analyse de la structure sociale vise à déterminer la dynamique du groupe étudié, les liens et les interactions entre les individus qui le composent, à travers leurs comportements sociaux. Ce faisant, nous cherchons à déterminer la composition du groupe social (une ou plusieurs unités sociales), s'il existe des liens privilégiés entre certains individus et si ceux-ci peuvent s'expliquer par des paramètres tels que leurs liens de parenté, leur sexe, leur âge (ou la classe d'âge à laquelle ils appartiennent), etc.

En pratique, nous avons estimé intéressant pour l'analyse sociale de généraliser les interactions observées entre deux ou trois individus aux interactions entre classes d'individus en fonction de l'âge (jeune : 0 à 3 ans ; immature : 4 à 9 ans ; femelle adulte : supérieur à 9 ans).

Il nous a fallu tout d'abord mettre en place un répertoire comportemental spécifique aux comportements de surface des cachalots. Lors de la socialisation (décrite par Whitehead, 2003), il semble que de nombreux comportements tactiles soient effectués, c'est pourquoi nous avons concentré notre répertoire sur ce que nous avons appelé la catégorie des « contacts ».

Ce travail nous permet notamment de montrer la diversité des interactions entre les membres d'un groupe social d'une trentaine de cachalots, dont nous allons par ailleurs pouvoir démontrer qu'il est formé d'au moins deux unités sociales distinctes et qu'il existe des liens de parenté entre ses membres.

## 2. Sujets, matériel et méthodes

### 2.1. Zone d'étude

Depuis 2011, la Marine Megafauna Conservation Organisation (MMCO) fondée par Hugues Vitry à l'île Maurice effectue des surveillances sur les grands mammifères marins. En 2013, le programme de recherche Maubydick a été mis en place pour étudier la population de cachalots résidents (fig. 2). Ce projet vise à déterminer la dynamique de la population de cachalots autour de Maurice. Il est entrepris en collaboration avec les associations Label Bleu Production, Longitude 181, Exagone, Megaptera et des volontaires, avec l'autorisation du ministère de la Pêche et de la Mauritius Film Development Corporation (MFDC).



**Figure 2.** Localisation de l'Île Maurice dans l'Océan Indien. © 2021 Google Earth.

Les eaux mauriciennes sont très riches en biodiversité, il est donc primordial de les préserver. Un des objectifs de la MMCO et des différentes associations étudiant les animaux marins est de recenser, d'étudier et de protéger les espèces marines menacées, principalement les cétacés (cachalots, dauphins, baleines, etc.), les tortues et les requins, mais aussi de sensibiliser les pêcheurs, les opérateurs maritimes et les communautés locales aux questions liées aux menaces océaniques telles que la protection et le respect des animaux. C'est dans cet esprit qu'ont été faites les observations et recueillies les données étudiées.

La base de données originale sur laquelle s'appuie notre recherche est constituée de vidéos collectées entre 2011 et 2021. Elle nous a été fournie par une équipe d'observateurs scientifiques formée de nageurs avec palmes-masque-tuba et d'un plongeur avec bouteille. La majorité des cachalots observés réside sur la côte ouest de l'Île Maurice dans l'Océan Indien. Durant ces années, plusieurs groupes de cachalots ont été localisés essentiellement au nord-ouest des côtes mauriciennes, suivis au niveau acoustique à l'aide d'hydrophones et filmés grâce à des caméras sous-marines de type GoPro, Sony F55 4K et EXIR HD. Le gouvernement mauricien n'autorisant pas les observations de cétacés l'après-midi, toutes les sorties en mer ont lieu le matin entre le lever du soleil et midi. Lorsqu'un groupe de cachalots est repéré, le bateau s'en approche à environ 100m, les observateurs se mettent à l'eau, ensuite le bateau s'éloigne à une distance d'environ 300m des cachalots en accord avec la Charte d'approche et d'observation responsables des mammifères marins. Par sécurité et respect des animaux, les plongeurs maintiennent une distance d'environ 10m avec les individus. Aucune tentative de toucher, de harcèlement et de poursuite n'est autorisée.

## 2.2. Sujets d'étude

A ce jour, au large de l'Île Maurice, trois groupes sociaux principaux de plusieurs matriarches avec des juvéniles sont connus, formant une population d'environ 99 cachalots (Barteneva, 2021 ; Huijser *et al.*, 2019). D'après de rares publications consacrées à cette population, leur structure sociale présenterait de fortes interactions entre les individus avec des liens de parenté proches (Huijser *et al.*, 2020 ; Sarano, 2017 ; Sarano *et al.*, 2021a).

Nous avons focalisé nos recherches sur le groupe social le plus observé ces dernières années, constitué d'une trentaine d'individus. Longitude 181 l'appelle le « clan d'Irène Gueule Tordue », d'après le nom donné à une femelle adulte aisément reconnaissable. L'équipe d'observateurs dénombre 242 rencontres sur 281 sorties en mer entre 2015 et 2019. Ce groupe social a été particulièrement bien décrit à l'aide de cartes d'identité établies pour chaque individu sur base de photos recueillies par l'équipe, de façon à constituer un catalogue d'identification (Sarano *et al.*, 2021b).

### 2.2.1. Identification des individus

Pour étudier une population de cachalots, mieux comprendre sa structure sociale et les interactions entre individus, il est primordial d'identifier individuellement chaque membre (Gero *et al.*, 2014a ; Huijser *et al.*, 2019 ; Konrad *et al.*, 2018 ; Sarano *et al.*, 2021a, b ; Whitehead, 2008) ainsi que son sexe. C'est le cas de notre groupe social pour lequel un catalogue d'identification des individus a été réalisé.

Étant donné leur anatomie spécifique, l'identification individuelle des cachalots est délicate. La seule description de la nageoire dorsale du cachalot, sur laquelle se basent de nombreux spécialistes, ne suffit pas. Il faut pouvoir observer aussi les marques distinctives des nageoires caudale et pectorales, ainsi que les tâches et cicatrices présentes sur le corps, et notamment autour de la mâchoire. De plus, pour connaître le sexe, il est nécessaire de pouvoir visualiser l'arrière du ventre de l'individu.

Le catalogue mis à notre disposition est constitué de fiches spécifiques pour chaque individu et adapté tous les ans en fonction des évolutions des marques naturelles, de chaque dépigmentation, encoche, malformation, etc. Ces mises à jour sont effectuées à l'aide des captures vidéo permettant d'obtenir des identifications fiables pour chaque sujet (fig. 3).

LONGITUDE 181  
La Voix de l'Océan

CARTES D'IDENTITÉ  
CACHALOTS DE L'ÎLE MAURICE

un océan de vie  
TERIA  
Marine Merguliers Conservation Organisation

**IRÈNE GUEULE TORDUE** 1<sup>ÈRE</sup> OBS. : 2011-03-14 // DERNIÈRE OBS. : 2018-08-03 **PLAN DE IRÈNE**

ADULTE	VUE EN	SIGNES DISTINCTIFS
ADN		Taille : ≈ 10 m - mars 2018
♀	2011-2012 2013-2014 2015-2016 2017-2018	• Mère d'Arthur : accouchement probable, 5 avril 2013. • Nounou Ali, 3 mars et 9 avril 2018.

Dessus // 20 - 03 - 2014

Pectorale G. Irène gueule tordue

Pectorale D. INTACTE

2013 - 04 - 05 avec Arthur

2014 - 03 - 20 Dessus

2018 - 03 - 02 Dessus

Dorsale - côté G. 2018 - 03 - 13

Dorsale - côté D. 2018 - 04 - 22

Sexe - vue ventrale

© Longitude 181 - Conception : François Sarano - Graphisme & Illustration : Marion Sarano - Photos : Stéphane Granotelle, Fabrice Guérin, René Heuzey, Axel Pireud'homme, Mélanie & François Sarano, Hugues Vilry.

p. 13

**Figure 3.** Fiche d'identification de l'individu Irène Gueule Tordue. Extrait du catalogue d'identification réalisé pour l'année 2018 (© François Sarano / Longitude 181 / MMCO / Label Bleu).

Chaque carte d'identité fournit le nom, le sexe, les caractéristiques de chaque individu ainsi que, quand ils existent, les liens de parenté prouvés (Sarano *et al.*, 2021a, cfr. infra). Pour les cachalots juvéniles, les années de naissance sont consignées avec la période de naissance donnée avec autant de précision que possible. Nos recherches ayant porté sur le matériel audiovisuel récolté durant 3 années consécutives, nous avons utilisé les catalogues d'identification correspondant aux années spécifiques. En effet, l'évolution des marques distinctives ainsi que la coloration des taches ou blessures a semblé évoluer chez certains individus plus que chez d'autres (Sarano *et al.*, 2021b). Si le moindre doute d'identification d'un individu persistait, nous devions envoyer la vidéo à un des membres de l'équipe pour avoir une confirmation. Si l'identification n'était toujours pas possible, la vidéo était écartée.

### 2.2.2. Composition du groupe social

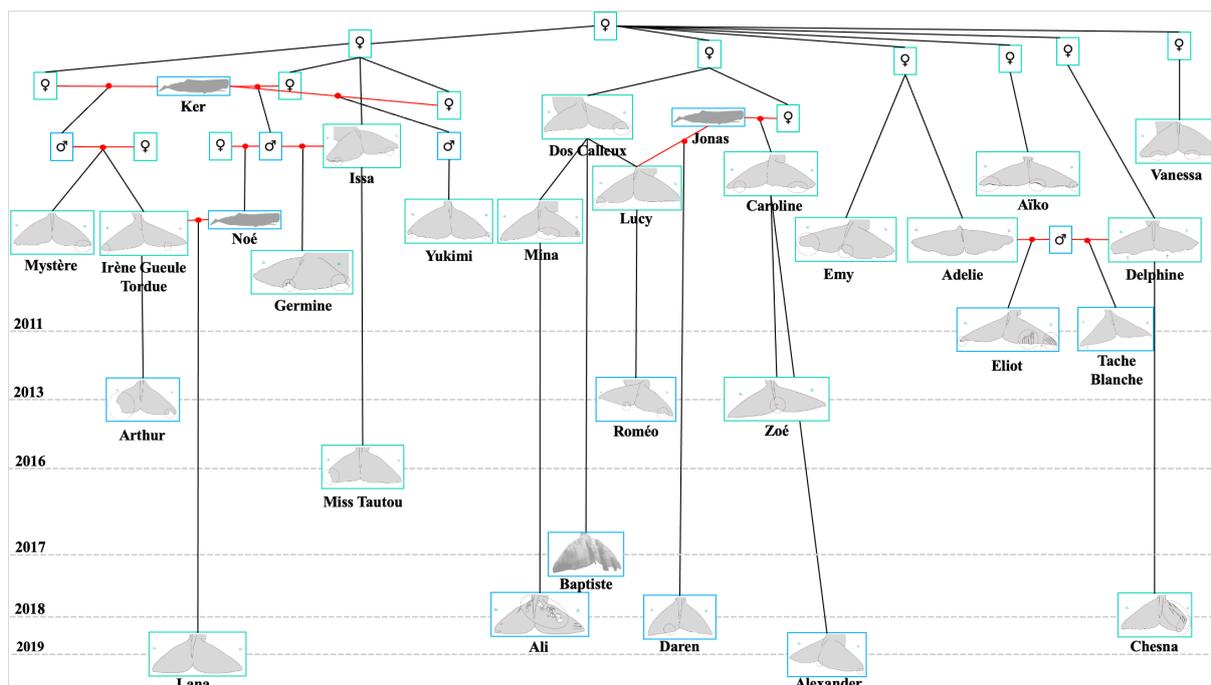
Nos observations portant sur les années 2017 à 2019 nous ont permis de dénombrer 17 femelles adultes ainsi que 12 juvéniles dans le groupe social que nous étudions (tab. 2). La taille totale de notre groupe évolue de 24 à 28 individus en fonction des années (compte tenu des naissances et disparitions).

Sujet	Sexe	Mère	Première observation	Tranches d'âge
<b>Alexander</b>	Mâle	Caroline	2019 (né 12/2018 ou 01/2019)	0-1 an
<b>Ali</b>	Mâle	Mina	2018 (février)	0-2 ans
<b>Arthur</b>	Mâle	Irène Gueule Tordue	2013 (avril)	4-6 ans
<b>Baptiste</b>	Mâle	Dos Calleux	2017 (mars)	0-1 an
<b>Chesna</b>	Femelle	Delphine	2018 (février)	0-2 ans
<b>Daren</b>	Mâle	Lucy	2018 (avril)	0-2 ans
<b>Eliot</b>	Mâle	Adélie	2011 (mars)	6-8 ans
<b>Lana</b>	Femelle	Irène Gueule Tordue	2019 (février)	0-1 an
<b>Miss Tautou</b>	Femelle	Issa	2016 (février)	1-3 ans
<b>Roméo</b>	Mâle	Lucy	2013 (mars)	4-6 ans
<b>Tache Blanche</b>	Mâle	Delphine	2011 (juin)	6-8 ans
<b>Zoé</b>	Femelle	Caroline	2013 (décembre ?)	4-6 ans
Adélie, Aïko, Caroline, Claire, Deline, Delphine, Dos Calleux, Emy, Germiné, Irène Gueule Tordue, Issa, Lucy, Mina, Mystère, Swastee, Vanessa, Yukimi	Femelle	/	De 2007 à 2012	> à 9 ans

**Tableau 2.** Informations sur le groupe social étudié reprise du catalogue d'identification (Sarano, 2020).

### 2.2.3. Structure sociale

De façon générale, l'étude de la structure sociale se base au départ sur l'identification individuelle et l'enregistrement des interactions comportementales entre individus. Pour expliquer en partie la variance des schémas d'interactions ou de relations, il est utile d'étudier des éléments comme la parenté, les classes d'âges et le sexe des individus pouvant exercer une forte influence sur la structure sociale (Whitehead, 2008). Nous connaissons déjà l'identité et le sexe de chaque individu de notre groupe social grâce aux cartes d'identités fourni par Longitude 181. Ensuite, nous avons accès à l'arbre généalogique (fig. 4) du groupe, ce qui nous a permis d'établir le lien de parenté entre la plupart des individus, grâce à différentes sources (Girardet *et al.*, 2021 ; Sarano *et al.*, 2021a, b).



**Figure 4.** Arbre généalogique du groupe social étudié (« clan d'Irène Gueule Tordue »).

Vert = femelle ; bleu = mâle ; rouge = lien de reproduction.

Modifié par Lara Berkenbaum (sources : Girardet *et al.*, 2021 ; Sarano *et al.*, 2021a, b.)

Claire, Déline et Swastee, trois femelles adultes faisant partie du groupe social n'apparaissent pas dans l'arbre généalogique pour des raisons telles que le manque d'information sur leur matériel génétique. A l'inverse, Aïko, une autre femelle adulte apparaît dans l'arbre mais pas dans le sociogramme (cfr. infra). Elle a été présente dans les vidéos mais n'a pris part à aucune interaction visible avec d'autres individus.

#### 2.2.4. Classes d'âges

Nous avons choisi de regrouper les individus en 3 classes d'âges : jeunes, immatures et femelles adultes. Ce choix se base sur l'analyse de deux comportements spécifiques (tête – fente génitale et nage accompagnée, cfr. infra) qui illustrent l'évolution des relations entre la mère et son veau en fonction de son âge.

Il est difficile de justifier un découpage en classes d'âges sur base de critères biologiques ou éthologiques. En effet, la littérature a tendance à utiliser des termes différents pour parler de ce que nous catégorisons comme juvéniles, incluant ce qu'on appelle les jeunes (0 à 3 ans) et les immatures (4 à 9 ans) (tab. 3). Dans cette étude, nous nous intéressons aux comportements réalisés par les cachalots juvéniles. Et notamment au fait de savoir s'il y a des différences ou des évolutions en fonction de l'âge.

Cependant, du fait de la structure sociale du groupe, regrouper les cachalots par année donne finalement un nombre d'individus trop faible pour produire des résultats statistiquement significatifs. C'est précisément pour pouvoir comparer et différencier les comportements entre jeunes, immatures et adultes qu'il est intéressant de fonder l'analyse sur l'étude des classes d'âges. Certains résultats nous ont permis de les déterminer.

Notons qu'il faut tout de même rester prudent avec la définition des différentes classes lorsque les données sont peu nombreuses ou éparses, pouvant alors rendre la puissance de l'analyse sociale insuffisante (Whitehead, 2008).

Classes d'âges	Tranches d'âges	Nom des individus par année de présence			Total d'individus	Temps total de présence (hh:mm:ss)
		2017	2018	2019		
Jeunes	[0-1[	Baptiste	Ali, Chesna, Daren	Alexander, Lana	7	4:17:05
	[1-2[	Miss Tautou	/	Ali, Chesna, Daren		
	[2-3[	/	Miss Tautou	/		
	[3-4[	/	/	Miss Tautou		
Immatures	[4-5[	Arthur, Roméo, Zoé	/	/	5	4:23:09
	[5-6[	/	Arthur, Roméo, Zoé	/		
	[6-7[	Eliot, Tache Blanche	/	Arthur, Roméo, Zoé		
	[7-8[	/	Eliot, Tache Blanche	/		
	[8-9[	/	/	Eliot, Tache Blanche		
Femelles adultes	> 9	Adélie, Aiko, Caroline, Claire, Déline, Delphine, Dos Calleux, Emy, Germiné, Irène Gueule Tordue, Issa, Lucy, Mina, Mystère, Swastee, Vanessa, Yukimi			17	4:17:17

**Tableau 3.** Représentation des 3 tranches d'âge : jeunes (0 à 3 ans), immatures (4 à 9 ans) et femelles adultes (supérieur à 9 ans) avec le nom et le temps de présence des individus sur les 3 années d'observation.

### 2.3. Répertoire comportemental

Toute étude éthologique repose sur l'établissement d'un répertoire comportemental, c'est-à-dire un catalogue des comportements observables des animaux étudiés. Ce répertoire préexiste pour de nombreuses espèces abondamment étudiées. Ce n'était pas le cas pour notre étude. Il n'existait jusqu'à récemment que des comportements identifiés pour des cachalots (inter)agissant lorsqu'ils se trouvent à la surface, en partie hors de l'eau (comportements aériens).

Exemples : saut, battement de queue, « spyhopping » (tête hors de l'eau), etc. (Goddard, 2015 ; Whitehead, 2003). Il existait aussi des hypothèses de comportements, uniquement déterminées grâce aux études acoustiques.

A partir des enregistrements audio-vidéo collectés par les experts de l'équipe, un répertoire de comportements a été établi. Une première version a été faite par deux mémorants en 2018 (Sauvêtre et Yernaux, 2018). Puis, avec une autre mémorante (Marie Larivière), nous l'avons reconsidéré en profondeur, c'est-à-dire complété, adapté et modifié pour les besoins de nos études en nous appuyant sur le pré-visionnage de nombreuses heures de vidéos.

Au total, nous avons ainsi répertorié 26 comportements que nous avons regroupés dans 6 catégories principales : 5 catégories de comportements « sociaux » et 1 catégorie de comportements « acoustiques » (tableaux 4 et 5). A noter que ces derniers avaient déjà été bien documentés, par exemple par Hal Whitehead, premier à avoir utilisé le mot « culture » pour décrire les unités sonores des cachalots ; Luke Rendell, premier à avoir publié sur les codas en 2004 ; Bertel Møhl a décrit la propagation parcourue par le clic dans la tête d'un cachalot en 2001 et 2003 ; Shane Gero publiant actuellement le plus sur l'acoustique des cachalots.

### 2.3.1. Comportements sociaux

Pour notre étude, la catégorie la plus pertinente et la plus fournie en comportements est celle dite de « contact ». En effet, les cachalots sont une espèce haptique, effectuant de nombreux contacts de différents types, que nous avons essayé de mettre en évidence. Cette catégorie comporte au total 13 touchers physiques.

Ensuite, nous avons déterminé la catégorie appelée « rotation ». Les cachalots vivent dans un environnement aquatique qui leur permet d'effectuer des mouvements spécifiques dans l'espace, comme le fait de tourner sur eux-mêmes. Les comportements que nous avons nommés « bascule » et « vrille » ont été mis en évidence.

Une catégorie particulière nommée « déplacement » a été décrite seulement par deux comportements spécifiques : l'« approche » et la « nage accompagnée ». Les mouvements de déplacements individuels (nage horizontale ou verticale, plongée, etc.) ont été volontairement exclus de notre répertoire car ils ne constituent pas des interactions certaines entre deux ou plusieurs individus.

La catégorie « exploration » considère deux comportements distincts. L'exploration commune identifie les interactions liées au « partage » d'un objet comme un morceau de bois, un sac plastique, une algue, etc. entre deux ou plusieurs individus.

Ce comportement peut potentiellement être assimilé à un jeu (Goddard, 2015). Le deuxième comportement de cette catégorie est l'ouverture/fermeture de bouche. Nous voulions savoir dans quelle situation et dans quel contexte les cachalots ouvrent leur bouche.

La dernière catégorie est constituée d'un seul comportement : le « sexe sorti ». Le but était d'identifier l'âge à partir duquel les juvéniles mâles mettent en évidence leur attribut et dans quelle situation spécifique.

<b>Catégorie</b>	<b>Comportement</b>	<b>Description</b>
Contact	<b>Dos - Dos</b>	Les individus A et B se touchent dos contre dos.
Contact	<b>Dos - Ventre</b>	Le dos de l'individu A touche le ventre de l'individu B.
Contact	<b>Ventre - Ventre</b>	Les individus A et B se touchent ventre contre ventre.
Contact	<b>Ventre - Latéral</b>	Le ventre de l'individu A touche le côté latéral droit ou gauche de l'individu B.
Contact	<b>Latéral - Latéral</b>	Les individus A et B se touchent latéralement.
Contact	<b>Latéral - Dos</b>	Le côté latéral de l'individu A touche le dos de l'individu B.
Contact	<b>Tête - Corps</b>	La tête de l'individu A touche une partie du corps de l'individu B.
Contact	<b>Tête - Tête</b>	La tête de l'individu A touche la tête de l'individu B.
Contact	<b>Queue - Corps</b>	La queue de l'individu A touche le corps de l'individu B.
Contact	<b>Queue - Queue</b>	La queue de l'individu A touche la queue de l'individu B.
Contact	<b>Mandibule - Mandibule</b>	La mandibule de l'individu A touche la mandibule de l'individu B.
Contact	<b>Mordre</b>	L'individu A ouvre la bouche et la referme sur l'individu B.
Contact	<b>Tête - Fente génitale</b>	L'individu A touche l'individu B par un mouvement de tête au niveau de la fente génitale, afin d'effectuer une séquence d'allaitement (avec ou sans introduction de la mandibule dans la fente).
Déplacement	<b>Approche</b>	L'individu A modifie sa trajectoire et s'oriente vers l'individu B. L'orientation de sa tête ou de son corps réduit l'espace qui le sépare d'un ou plusieurs autres individus (modification de la trajectoire).

Déplacement	<b>Nage accompagnée</b>	L'individu A nage : - la tête positionnée au niveau du dernier tiers du corps de l'individu B - tout en nageant en phase/au même rythme/ à la même cadence que l'individu B - dans le même alignement et la même direction que l'autre individu - pendant au moins 2 secondes.
Exploration	<b>Exploration commune</b>	L'individu A et l'individu B entrent en contact, explorent avec leur tête, leurs corps ou leur gueule le même objet (exemple : jeu avec des algues, sac plastique etc.).
Exploration	<b>Ouverture / Fermeture bouche</b>	L'individu A ouvre et ferme la bouche plusieurs fois d'affilée ou la maintient ouverte durant un certain temps (> 2 secondes).
Rotation	<b>Bascule</b>	Tout son corps se retourne, son centre de gravité se déplace dans l'espace. Proche du comportement de "vrille" mais selon 2 axes.
Rotation	<b>Vrille</b>	Fait un tour sur lui-même : l'individu peut faire un tour complet, un ½ tour (ventre → dos ; dos → ventre), un ¼ de tour ou se retourne dans le sens de la longueur, inversement sens tête-queue. Son centre de gravité reste le même selon un axe.
Sexe sorti	<b>Sexe sorti</b>	L'individu A a le sexe sorti.

**Tableau 4.** Répertoire des comportements sociaux.

### 2.3.2. Comportements acoustiques

La dernière catégorie répertoriée concerne les vocalises des cachalots. Nous voulions mettre en évidence les différents types de « clics » émis lors des interactions entre individus, c'est-à-dire dans quel environnement acoustique des actions ont été réalisées par les individus observés. A l'aide de la littérature, nous avons subdivisé cette catégorie en six types de vocalises : buzz, clang, clic isolé, clic régulier, coda et miaulement. Grâce au logiciel Audacity, nous avons analysé chaque bande son des vidéos pour identifier les vocalises émises pendant les interactions entre individus, noter leur fréquence, leur durée, etc. Il ne nous a pas été possible de déterminer les individus à l'origine de chaque émission sonore. Nous avons cependant tenté de mettre en évidence les types de clics les plus fréquemment émis en lien avec certains comportements sociaux.

Catégorie	Comportement	Description
Vocalise	<b>Buzz</b>	Émission d'une succession de clics dont l'ICI diminue nettement, au point que les clics deviennent indissociables à l'oreille humaine.
Vocalise	<b>Clang</b>	Émission d'un clic puissant à sonorité métallique.
Vocalise	<b>Clic</b>	Émission d'un clic isolé.
Vocalise	<b>Clic régulier</b>	Émission d'une succession de clics dont l'ICI est constant sur toute l'émission.
Vocalise	<b>Coda</b>	Émission d'une série de clics ayant un ICI plus ou moins réguliers, parfois répétitive.
Vocalise	<b>Miaulement</b>	Émission d'un son court ressemblant au miaulement d'un chat.

**Tableau 5.** Répertoire des comportements acoustiques. ICI = l'intervalle inter-clic.

## 2.4. Base de données

Dans le cadre de notre étude, nous travaillons sur des données détaillées, recueillies entre 2017 et 2019 par Longitude 181. En 2017, on comptabilisait 788 vidéos réparties sur 46 jours d'observation (15:23:29) ; en 2018, 838 vidéos sur 42 jours d'observation (15:43:16) ; en 2019, 804 vidéos sur 35 jours d'observation (19:27:38). La durée totale de ces 2430 vidéos, comptabilisant 123 jours d'observation, est de 50 heures, 35 minutes et 56 secondes.

### 2.4.1. Sélection des données

Pour exploiter au mieux notre jeu de données, nous avons dû établir des critères de sélection/exclusion des vidéos disponibles. La difficulté – voire l'impossibilité – d'analyser des interactions simultanées entre plus de 3 individus nous a contraints à concentrer notre étude sur les interactions sociales en dyade (2 individus) et en triade (3 individus). Le choix des dyades/triades permet d'obtenir plus de certitudes au niveau des comportements analysés (Whitehead, 2008). Lorsque les cachalots sont en « socialisation », il devient extrêmement compliqué de décrire les événements avec précision : plus le nombre de cachalots est important, plus il est difficile de visualiser leurs comportements car les plongeurs ne tournent pas autour d'eux. Pour définir les interactions/associations, nous avons considéré, de manière arbitraire, qu'une dyade ou une triade est constituée d'individus proches et/ou en contact physique. Ce qui veut dire n'excédant pas une distance d'une longueur de cachalot de taille moyenne. Un individu est donc considéré comme faisant partie d'une dyade ou d'une triade lorsqu'il se trouve à environ une longueur de corps d'adulte d'un autre cachalot.

Pour répondre à ces exigences, nous avons exclu toutes les vidéos ne montrant aucun cachalot, incluant la présence d'un individu isolé ou de 7 cachalots ou plus. Nous gardions les vidéos constituées de maximum 6 individus dans l'éventualité de pouvoir observer la formation d'une dyade et/ou d'une triade. Nous avons également éliminé les vidéos dans lesquelles il n'était pas possible d'identifier de façon certaine un individu présent, incluant plus de 4 cachalots en interaction, présentant une mauvaise visibilité, filmée depuis un bateau et/ou hors de l'eau, présentant des doublons ou les mêmes séquences prises sous différents angles et montrant une possible interaction directe des cachalots avec le ou les plongeurs. Le dernier critère d'exclusion reposait sur l'absence de détection d'une quelconque interaction (visuelle et/ou acoustique). Ce qui nécessitait tout de même une analyse approfondie de la vidéo.

Une sélection importante a donc été effectuée dans la base de données et répertoriée dans un premier fichier Excel regroupant toutes les informations générales de nos vidéos. Le premier visionnage a permis de recenser toutes les vidéos et de vérifier les différents critères d'analyses repris précédemment. Ainsi, sur les 2430 vidéos originales, 1529 ont été triées et analysées, et 1062 (19:58:29) ont été exclues car elles ne correspondaient pas à nos critères de sélection.

Ensuite, dans un second fichier Excel, nous avons répertorié toutes les vidéos avec lesquelles nous avons pu effectuer une analyse de comportement (sociaux et acoustiques) : 224 vidéos au total, ce qui signifie : **5 heures 20 minutes et 13 secondes** (tab. 6). Pour 2017, 84 vidéos analysées portant sur 35 jours de mars à juin ; pour 2018, 87 vidéos sur 19 jours de février à octobre ; pour 2019, 53 vidéos sur 18 jours de février à avril.

Année	Durée d'analyse de comportement (hh:mm:ss)	Nombre de vidéos analysées	Périodes analysées	Nombre de jours
2017	01:59:23	84	Mars à juin	35
2018	01:57:46	87	Février à octobre	19
2019	01:23:04	53	Février à avril	18
<b>total</b>	<b>05:20:13</b>	<b>224</b>	<b>13 mois</b>	<b>72</b>

**Tableau 6.** Récapitulatif du total de vidéos analysés au niveau des comportements sociaux et acoustiques.

#### 2.4.2. Technique d'observation des comportements sociaux

Le premier fichier Excel nous a permis de regrouper les informations afférentes à chaque vidéo analysée (jour, heure, lieu, observateur), de trier nos données en fonction des critères d'exclusion et d'avoir une connaissance affinée de la base de données originale.

Les vidéos répondant favorablement aux différents critères d'analyse de notre répertoire comportemental étaient regroupées dans un second fichier Excel, spécifique à l'analyse des comportements de notre groupe social de cachalots. Dans ce fichier, nous avons visionné chaque vidéo en détail et répertorié tous les comportements corrélés à notre répertoire comportemental, en utilisant une méthode d'échantillonnage complet et continu. Tous les comportements enregistrés ont pu être attribués à des individus identifiés. Nous avons par ailleurs constaté qu'un même individu pouvait combiner plusieurs actions simultanées, jusqu'à 4 dans nos observations.

Nous avons assisté à plusieurs interactions entre les individus de notre groupe et quatre mâles adultes différents (Anjhin, Daniel, Navi et Vasilily) mais nous ne prenons pas en considération ces interactions dans nos analyses. Deux raisons principales à ce choix : le fait que le nombre d'interactions fut minime (cinq au total pour de courtes durées) et qu'aucun de ces mâles ne semble à priori avoir de liens de parenté proche avec nos individus. Alors que les quelques mâles adultes (Jonas, Ker, Noé) représentés dans l'arbre généalogique (cfr. supra) n'ont pas été observés dans les vidéos analysées.

Enfin, pour pallier aux biais potentiels découlant de la présence d'observateurs dans l'analyse des comportements, augmenter la fiabilité des observations et lever toute ambiguïté sur les comportements du répertoire, une « marche à suivre » spécifique à notre étude a été élaborée. A partir de ce document explicite, toutes les vidéos ont été systématiquement annotées par au moins 2 experts pour minimiser les biais dus à la fatigue ou à la baisse de concentration (Nguyen Hong Duc *et al.*, 2021).

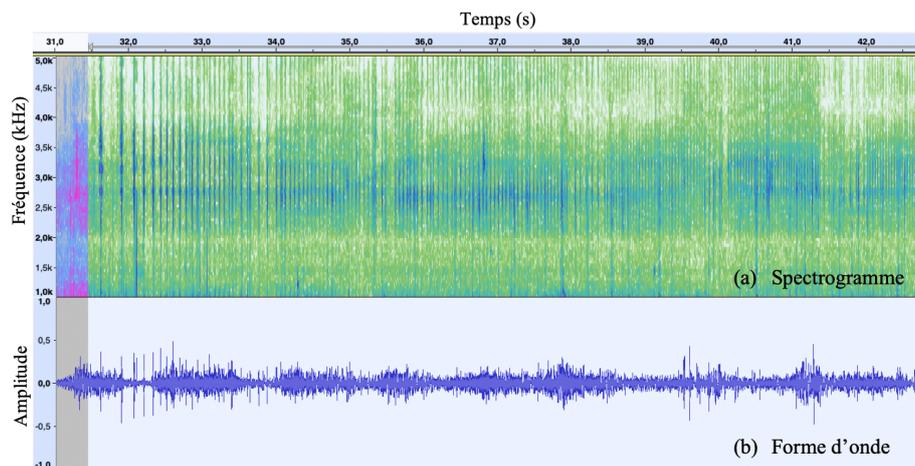
#### 2.4.3. Extraction et analyse des émission sonores

La bande son de chaque vidéo analysée a été extraite via le logiciel « Audacity » pour analyser les vocalises et les noter dans notre second fichier Excel. Les annotations ont été faites manuellement sur base visuelle à partir du spectrogramme et/ou à l'oreille, en ralentissant la vitesse de lecture et en zoomant sur les séquences. Lorsque des sons étaient superposés les uns aux autres, nous le précisions et essayions tout de même d'enregistrer leur structure, soit en observant de plus près les différences d'intensité du signal, soit par les différences de tonalités – et en réécoutant de nombreuses fois la bande son. Si l'identification du son ou le relevé de la structure n'était vraiment pas faisable, par exemple si le son n'était pas audible ou s'il y avait trop de superpositions, nous indiquions « non identifiable » ou « cacophonie » dans notre fichier. Étant dans l'incapacité de déterminer l'émetteur d'un son spécifique, nous ne pouvions par ailleurs considérer les individus lors de l'analyse des données sonores.

Notre étude se focalise principalement sur trois types de sons : les buzz, les codas et les clics réguliers, étant les plus représentatifs par le nombre d'occurrences.

#### 2.4.3.1. Les buzz (ou « creaks »)

Le buzz est constitué de clics courts (0,1 à 5 ms) et plus rapprochés (ICI de 5 à 100 ms). C'est une émission d'une succession de clics dont l'ICI diminue nettement, au point que les clics deviennent inaccessibles à l'oreille humaine (fig. 5).



**Figure 5.** Représentation du début d'un buzz dans le logiciel Audacity.

#### 2.4.3.2. Les codas et clics réguliers (ou « usual clicks »)

Pour communiquer entre eux, les cachalots utilisent les codas qui peuvent être regroupées en différents types (Oliveira *et al.*, 2016 ; Rendell et Whitehead, 2003). Les clics de codas comprennent une série d'impulsions et le délai entre les impulsions est fonction de la taille de l'organe émetteur, donc potentiellement de la taille du corps (Oliveira *et al.*, 2016). En effet, pour chaque clic de même type et au sein d'un même clic, l'intervalle inter-pulse est constant pour un individu donné d'après Goddard (2015), ensuite les codas auraient des caractéristiques individuelles cohérentes dans leurs intervalles inter-clics et inter-pulses, pouvant contribuer à l'identification individuelle d'après Oliveira *et al.* (2016). Il est possible que les cachalots utilisent les codas pour transmettre des informations sur l'identité et sur l'activité au sein d'un groupe social (Oliveira *et al.*, 2016).

Pour décrire la structure des codas et des clics réguliers, nous avons utilisé la même méthode que Weilgart et Whitehead (1993) : les clics « courts » sont additionnés entre eux et les clics « longs », dont l'ICI est 50% supérieur à la moyenne des autres ICI, sont notés « +1 ». Une coda d'une structure « 2 clics courts, 6 clics longs » est notée : 2+1+1+1+1+1+1 (fig. 6).

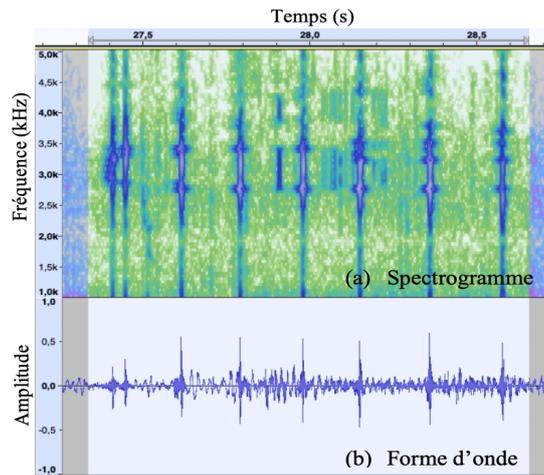


Figure 6. Représentation, dans Audacity, d'une coda « 2+1+1+1+1+1+1 ».

Pour les clics réguliers, les structures sont notées « [nombre de clics] R ».

Exemple : 6 R pour six clics réguliers (fig. 7).

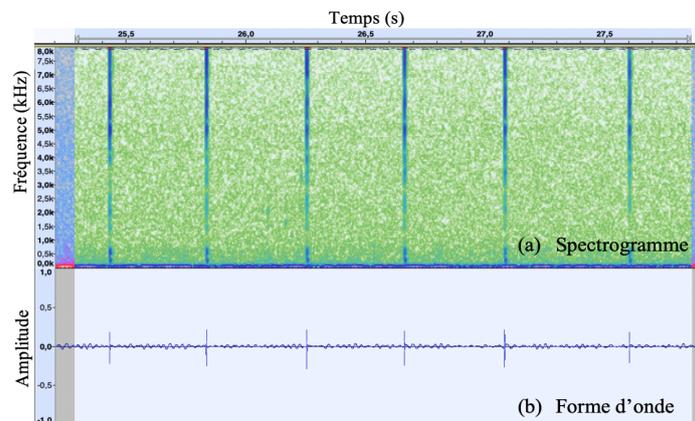


Figure 7. Représentation, dans Audacity, d'un clic régulier appelé « 6R ».

## 2.5. Limites méthodologiques

Basée sur l'analyse de dizaines d'heures de données audiovisuelles, notre étude, comporte certaines limites méthodologiques.

Il s'agit tout d'abord d'une étude « opportuniste » dans le sens où nous avons exploité des données vidéos qui n'avaient pas d'objectif scientifique au départ, mais documentaire, cinématographique voire esthétique. Les images et les sons analysés ne sont pas toujours adaptés à la recherche et nous imposent de garder une certaine prudence dans l'interprétation des résultats. Certaines vidéos ne montrent pas des séquences comportementales complètes, le cadre pouvant être décalé vers d'autres individus effectuant d'autres comportements. D'autres vidéos peuvent avoir été coupées alors que le comportement étudié était toujours en cours. Il faut considérer que la prise de vidéos sous-marines des cachalots n'est pas chose aisée.

Cependant, l'expérience professionnelle des auteurs de ces vidéos leur confère une qualité suffisante pour les besoins de notre étude.

Cette étude porte par ailleurs sur l'analyse des comportements de cachalots en surface. Cela n'avait pas été fait auparavant. Sans doute parce qu'il est raisonnable de considérer que, dans le cadre d'une étude éthologique, la simple présence de plongeurs dans l'eau et à proximité des cachalots peut influencer sur leurs comportements. La Charte d'approche et d'observation responsable des mammifères marins déconseille de se mettre à l'eau avec des cétacés, à la fois pour la sécurité des plongeurs et pour le bien-être des animaux. Le fait d'accorder un certain crédit à ce genre d'étude de population peut donc porter à discussion. Malgré tout, les observateurs expérimentés qui ont fourni ces images sont peu nombreux, toujours les mêmes et maintiennent autant que possible une distance de sécurité d'environ 10m avec les individus. Depuis le début des observations, aucune situation dangereuse n'a été signalée.

Nous savons aussi que la présence de plongeurs perturbe les activités des animaux mais le gouvernement mauricien n'a jusqu'ici accordé l'autorisation d'observer les cétacés qu'à la MMCO et uniquement le matin. Les touristes voulant observer les cétacés autour de l'Île Maurice sont tenus de rester dans un bateau et doivent suivre des règles bien précises pour ne pas perturber les mammifères. Les animaux ne sont donc pas harcelés par des bateaux trop nombreux et présents continuellement. En outre, depuis le début de ce projet, les observateurs n'ont noté aucun comportement qu'on pourrait assimiler à une fuite vis-à-vis des plongeurs. Les dérangements semblent acceptables voire minimes pour les cachalots qui poursuivent leurs activités. Cela reste néanmoins difficile à prouver et il faut à tout prix empêcher que les restrictions émises par les autorités mauriciennes ne changent face à la demande touristique.

L'absence visible de perturbation des individus pourrait être due en partie à un phénomène d'habituation et/ou de familiarisation. Les observations ayant lieu chaque année, depuis une dizaine d'années, avec un même groupe social de cachalots et par les mêmes observateurs, les individus peuvent s'être habitués à la présence des plongeurs dans leur environnement social.

Enfin, une limite précédemment évoquée concerne l'attribution des vocalises aux individus étudiés. Les caméras utilisées possèdent seulement un microphone chacune, ce qui rend impossible de localiser la source des sons émis. Plusieurs équipes spécialisées dans la bioacoustique travaillent actuellement au développement de dispositifs associant un réseau d'hydrophones et une caméra, pour permettre de filmer et détecter les sources d'émission des sons (communication personnelle). Cela permettrait de connaître avec précision l'émetteur du son à un moment donné.

En outre, un autre travail de recherche en cours vise à déterminer quel individu émet quelle coda en s'appuyant sur la taille des IPI. Il sera intéressant de pouvoir faire ultérieurement le lien entre les résultats obtenus au niveau des émetteurs de codas et les comportements sociaux observés dans le cadre de notre étude.

## 2.6. Analyses statistiques

Pour réaliser notre sociogramme, nous avons utilisé des logiciels pour l'analyse des réseaux sociaux, UCINET 6 for Windows (version 6.730) et NetDraw (version 2.177).

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel XLSTAT (version 3.3.1). Des statistiques descriptives (minimum, maximum, moyenne, écart-type) ont été appliquées sur chacune des variables que nous voulions tester. Pour ce faire, nous avons calculé la fréquence d'occurrence en secondes correspondant à l'occurrence d'un comportement divisée par la durée et ensuite multiplié par un facteur 100. Il était utile de calculer la fréquence d'occurrence pour pouvoir ajuster nos données car le temps d'observation de chaque individu était différent et parce que tous les individus n'étaient pas présents lors des 3 années étudiées.

Lorsque dans les analyses nous utilisons le terme « femelle adulte », nous avons pris la décision de ne prendre que les données correspondant à 7 femelles adultes (Dos Calieux, Delphine, Emy, Germinie, Irène, Mina et Vanessa), étant celles qui ont été le plus observées.

Pour chaque comportement, nous avons au préalable vérifié la normalité des données en appliquant le test de Shapiro-Wilk (voir annexe 2). Ensuite, selon la normalité des données, différents tests paramétriques et non paramétriques ont été réalisés (test t de Student, ANOVA, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney). Chaque test a été utilisé de façon spécifique en fonction des variables étudiées.

L'analyse des sons ne nous permettant pas d'attribuer les vocalises émises à tel ou tel individu, nous avons choisi de « lier » a posteriori les vocalises avec les comportements sociaux et les individus. Les structures de codas émises en même temps qu'un comportement lui ont été associées, considérant que son nombre de liaison avec ce comportement sera plus élevé qu'avec une autre structure de coda dont l'occurrence au moment du comportement serait due au hasard ou correspondrait à un autre individu. Pour ce faire, un tableau de contingence croisant les différentes structures de codas et les comportements du répertoire comportemental a été réalisé. Ensuite, tous les croisements comportements-codas avec une occurrence de moins de 5 ont été retirés et un test de  $\chi^2$  d'indépendance a été conduit à l'aide du tableau de contingence.

## 2.7. Hypothèses

Voici les différentes hypothèses que nous avons tenté de valider.

### 1. Structure sociale

- Le groupe social étudié est-il constitué d'une ou plusieurs unités sociales et quels sont les liens qui unissent les membres du groupe et des unités qui le composent, le cas échéant ?
- Le groupe (et/ou les unités sociales) est-il matrilineaire ?
- La cohésion du groupe (et/ou des unités sociales) repose-t-elle sur des liens de parenté entre ses membres et/ou d'autres paramètres ?

### 2. Comportements sociaux

- Existe-t-il des différences et/ou des comparaisons possibles entre les comportements adoptés par les cachalots selon leur classe d'âge et leur genre ?
- Peut-on différencier les comportements des juvéniles selon qu'ils appartiennent à la classe d'âge des « jeunes » et des « immatures » ?

### 3. Comportements acoustiques

- L'analyse des comportements acoustiques permet-elle de définir un répertoire de codas spécifique au groupe étudié ?
- Un même groupe utilise-t-il des structures de codas différentes ?
- Est-il possible d'associer certains comportements spécifiques avec certaines vocalises lors des interactions entre individus ?

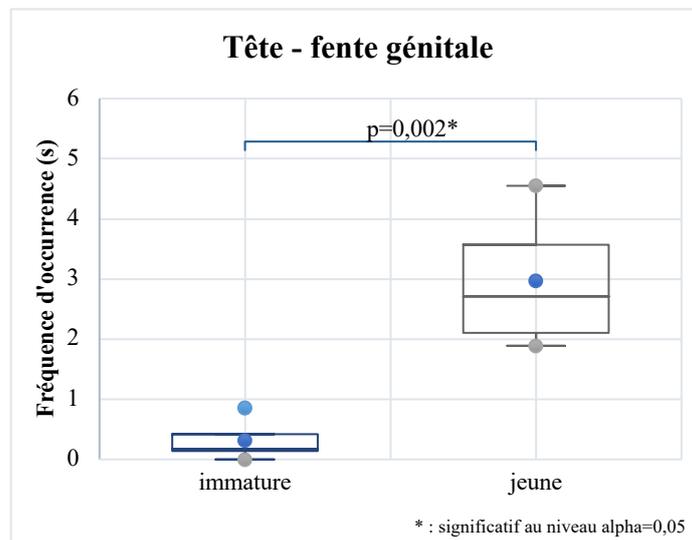
### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Structure sociale

##### 3.1.1. Jeunes et immatures

Les fiches d'identification à notre disposition nous permettent de connaître l'identité et le sexe de chaque individu membre du groupe social étudié. Pour donner plus de consistance à nos résultats vu le faible échantillon de juvéniles, nous avons opté pour un regroupement par classes d'âges (cfr. supra). Pour déterminer ces classes d'âges, nous nous sommes basés sur l'étude de deux comportements spécifiques. Les résultats de cette étude sont présentés ici.

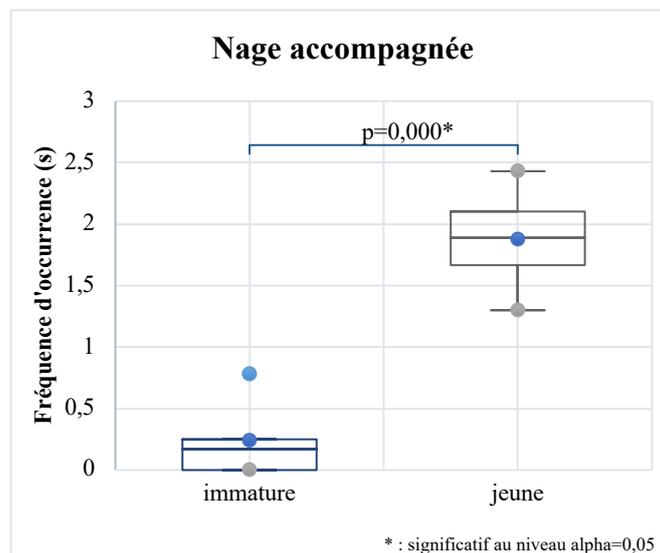
Le premier comportement étudié est une interaction « tête - fente génitale », dans la catégorie des contacts. L'individu A touche l'individu B par un mouvement de tête au niveau de la fente génitale, afin d'effectuer une séquence d'allaitement (avec ou sans introduction de la mandibule dans la fente). Il s'agit forcément d'une interaction entre un juvénile (jeune ou immature) et une femelle adulte.



**Figure 8.** Boîtes à moustache de la fréquence d'occurrence (en secondes ; X facteur 100) du comportement de tête – fente génitale (catégorie « contact ») en fonction des individus jeunes et immatures.

Pour vérifier s'il existe une différence significative entre les classes d'âges « jeunes » et « immatures », un Test t est utilisé qui confirme cette hypothèse ( $p\text{-value} < 0,05$ ). En effet, on observe qu'en moyenne les immatures effectuent moins de contacts tête – fente (0,32) que les jeunes (2,96). On constate également que pour les immatures, le minimum correspond à 0,00 avec un maximum de 0,86 alors que pour les jeunes, le minimum correspond à 1,89 avec un maximum de 4,55. Ensuite, ce sont les jeunes qui obtiennent la variance et l'écart-type les plus élevés (1,45 ; 1,21) par rapport aux immatures (0,12 ; 0,34).

Le second comportement étudié est la « nage accompagnée » (catégorie des déplacements). L'individu A nage la tête positionnée au niveau du dernier tiers du corps de l'individu B, tout en nageant en phase/au même rythme/à la même cadence que l'individu B, dans le même alignement et la même direction, pendant au moins 2 secondes. Le comportement de nage accompagnée étant un comportement plus long dans le temps, il est difficile de comparer directement ces 2 comportements. Malgré tout, les 2 graphiques mettent en évidence le fait que vers l'âge de 4-5 ans, la fréquence d'occurrence diminue fortement.



**Figure 9.** Boîtes à moustache de la fréquence d'occurrence (en secondes ; X facteur 100) du comportement de nage accompagnée (catégorie « déplacement ») en fonction des individus jeunes et immatures.

Les mêmes tests statistiques ont été utilisés pour la nage accompagnée. On obtient également une différence significative entre nos 2 classes d'âges (individus jeunes et immatures) avec une p-value < 0,05 (annexe 2). En ce qui concerne la fréquence d'occurrence des nages accompagnées, on observe que les immatures effectuent en moyenne moins ce comportement que les jeunes, avec des valeurs correspondant à 0,24 et 1,88. Les jeunes ont une variance ainsi qu'un écart-type plus élevés (0,22 ; 0,47) que les immatures (0,10 ; 0,32).

L'étude de ces deux comportements spécifiques devait nous permettre de distinguer à partir de quel âge les juvéniles effectuent moins ou n'effectuent plus de séquences d'allaitement ainsi que la « dépendance » des juvéniles à leur mère et/ou nurse et/ou baby-sitter. Les différentes phases de l'allaitement n'ont pas été détaillées dans cette étude car un autre mémorant (Yernaux, 2018) les a très bien décrites et nous voulions nous focaliser sur d'autres comportements. Ces résultats nous montrent qu'il existe bien une différence de comportement « tête – fente génitale » entre jeunes et immatures.

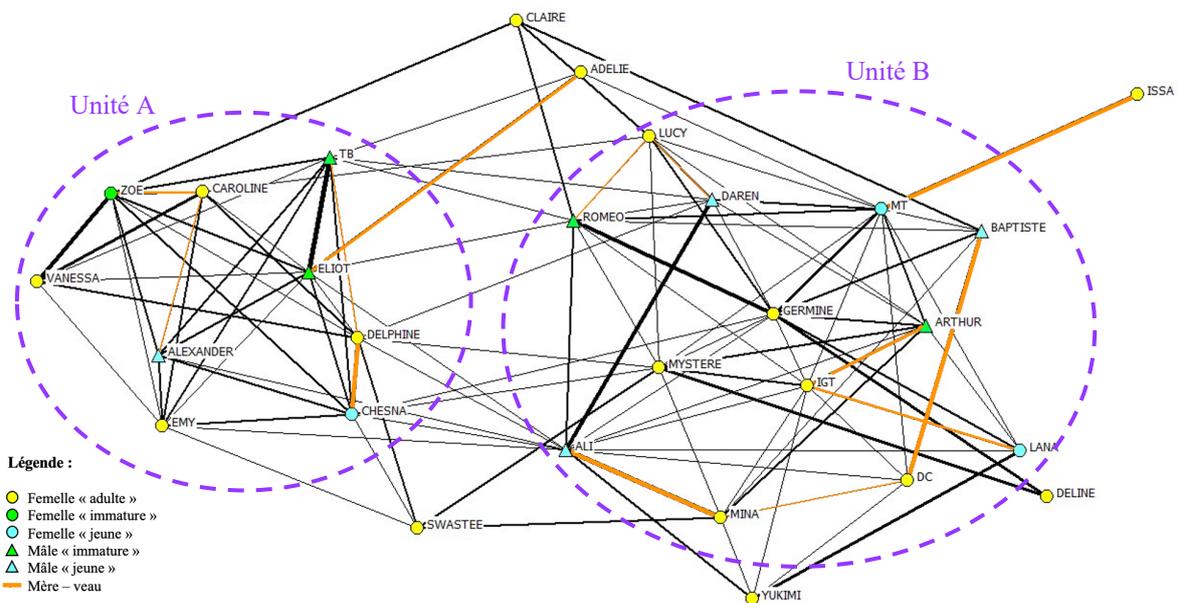
Nous supposons dès lors que, vers l'âge de 4 ans, les individus deviennent plus indépendants et nécessitent moins de contacts de ce type avec leur mère, nounou ou baby-sitter. Nous savons que les cachalots peuvent être allaités jusqu'à l'âge de 8 ans mais il est plus difficile de dire à partir de quel âge ils commencent à se nourrir par eux-mêmes tout en continuant à bénéficier d'allaitements.

En regroupant ces informations, nous avons estimé opportun de déterminer deux classes d'âges spécifiques : les « jeunes » désignant des individus âgés de 0 à 3 ans ; les « immatures » étant les sujets âgés de 4 à 9 ans. Les femelles adultes ont toutes a priori un âge supérieur à 9 ans (cfr. supra – Matériel et méthodes).

### 3.1.2. Sociogramme

Un sociogramme est une représentation sous forme de diagramme d'une structure sociale (Whitehead, 2008). Les individus sont représentés par des nœuds et les arêtes (les lignes) indiquent la force de la relation dyadique et/ou triadique. L'épaisseur des lignes (orange ou noires) varie en fonction de l'intensité du lien (Beauguitte, 2010). Plus la ligne est épaisse, plus il y a d'interactions entre les individus.

Ce sociogramme (fig. 10) se base sur le nombre d'occurrences des interactions entre individus en dyade et en triade. Les interactions avec d'autres individus ne faisant pas partie du groupe social, comme les mâles adultes, n'ont pas été prises en compte.



**Figure 10.** Sociogramme représentant les interactions entre individus du même groupe social. Réalisé avec les logiciels Ucinet et Netdraw.  
DC = Dos Calleux ; IGT = Irène Gueule Tordue ; MT = Miss Tautou ; TB = Tache Blanche

La première information fournie par notre sociogramme est qu'il y a potentiellement deux sous-groupes fortement connectés (un à droite et un à gauche sur notre graphique), dans lesquels deux individus se distinguent en particulier (Eliot et Germiné). Ceux-ci seraient des acteurs centraux pour les interactions indiquées par la position des nœuds. Ces deux sous-groupes sont constitués d'un nombre d'individus différent, mais on retrouve nos trois classes d'âges dans chacun d'eux. Dans le sous-groupe de gauche, il y a moins d'individus en général, mais trois individus immatures. Dans le sous-groupe de droite, il semble qu'il y ait cinq jeunes pour seulement deux immatures.

Si on se focalise maintenant sur les liens de parenté mère – veau (lignes orange), on observe que l'intensité du lien varie selon les individus. Plus la valeur précisée entre parenthèses est grande, plus il y a d'interactions entre les deux individus.

Les liens les plus forts entre mère et veau sont Mina – **Ali** (0,99) ; Dos Calieux (DC) – **Baptiste** (0,88) ; Issa – **Miss Tautou** (MT) (0,74) ; Delphine – **Chesna** (0,67) ; Adélie – Eliot (0,65) ; Irène Gueule Tordue (IGT) – Arthur (0,53) et **Lana** (0,35).

Il semblerait qu'il y ait moins d'interactions pour les relations mère – veau entre Caroline – Zoé (0,32) et **Alexander** (0,13) ; Lucy – **Daren** (0,29) ; Delphine – Tache Blanche (TB) (0,08) ; Dos Calieux – Mina (0,06).

L'intensité des relations entre mère et veau semble décroître en fonction de la classe d'âge. En effet, les individus en forte relation avec leur mère sont plutôt des individus « jeunes », à quelques exceptions. Lana, jeune femelle, semble effectuer plus d'interactions avec Yukimi (femelle adulte) pour 0,61 alors qu'avec sa propre mère seulement 0,35, et 0,24 avec Germiné (femelle adulte). Par ailleurs, des séquences d'allaitement avec évidence de lait entre Yukimi et Lana ont été observées en 2019, alors que Yukimi n'a jamais eu de veau à notre connaissance. Il en est de même pour Alexander, jeune mâle, obtenant des valeurs de 0,31 avec Emy (femelle adulte), alors qu'avec Caroline, seulement 0,13. Malgré tout, Alexander est en lien avec les trois individus immatures du sous-groupe de gauche, comprenant Zoé, sa sœur (0,33), ainsi que Eliot (0,28) et Tache Blanche (0,19). Une autre particularité concerne Daren (jeune mâle), qui a très peu d'interactions avec sa mère (Lucy ; 0,29). En revanche avec Ali, qui est aussi un jeune mâle, on obtient 0,67.

Ensuite, deux relations mère-fille ne sont pas représentées dans le sociogramme : Issa – Germiné et Dos Calieux – Lucy, ceci pouvant s'expliquer par le fait que toutes deux sont des femelles adultes. Un nœud plus périphérique comme celui de « Issa » indique que cet individu a très peu de liens avec les autres sujets.

Certains nœuds comme Claire, Deline et Swastee ont peu de liens, mais ils assurent en quelque sorte la jonction entre les groupes malgré que Claire n'a a priori aucun lien au premier degré avec les autres membres du groupe social - et nous ignorons la génétique de Deline et Swastee.

### 3.1.3. Discussion

Vu la taille du groupe étudié, l'une de nos hypothèses postulait qu'il était constitué de deux ou plusieurs unités sociales associées. C'est ce que nous avons essayé de confirmer à l'aide du sociogramme. De combien d'unités sociales notre groupe de cachalots est-il constitué ? Depuis 2017, l'équipe d'observateurs pensait avoir décelé une potentielle fission du groupe social. Il semble en réalité qu'il ne s'agirait pas d'une fission mais bien d'un groupe constitué de 2 unités sociales spécifiques (Konrad *et al.*, 2019 ; Whitehead *et al.*, 2011). Le sociogramme paraît en effet mettre en évidence l'existence d'une division au sein du groupe, articulée autour des sujets Eliot et Germinie.

Il est dès lors plausible d'envisager que notre groupe social est en fait constitué de deux unités sociales distinctes comptant respectivement une dizaine et une quinzaine d'individus. Des interactions récurrentes entre les deux unités sociales sont cependant toujours observées par Sarano *et al.* (2021a) et jusqu'à aujourd'hui, confirmant cette hypothèse. L'unité A serait alors constituée de 2 jeunes, 3 immatures et au moins 4 femelles adultes (environ 9 individus) alors que l'unité B serait formée de 5 jeunes, 2 immatures et au moins 6 femelles adultes (environ 13 individus).

La taille des unités sociales varie fortement en fonction du milieu de vie. Si on se réfère à la littérature, Whitehead (2003) évoque plusieurs études sur la taille des groupes de cachalots constitués de femelles et de juvéniles dans plusieurs océans du monde. La moyenne de ces groupes sociaux varie entre 18 et 30 individus (Whitehead, 2003). Dans le Pacifique par exemple, la moyenne est de 11 individus, soulignant le fait qu'il y a sans doute 2 à 3 unités sociales par groupe (Coakes et Whitehead, 2004 ; Huijser *et al.*, 2019). Dans l'Atlantique, les unités forment rarement des groupes sociaux et sont de taille légèrement plus petites (Antunes *et al.*, 2009 ; Gero *et al.*, 2014a ; Huijser *et al.*, 2019). Enfin dans l'Océan Indien, Huijser *et al.* (2019) ont relevé que la taille des unités sociales peut varier entre 3 et 24 individus, selon Christal et Whitehead (2001). Mais en ce qui concerne les populations de cachalots dans l'Océan Indien, les unités sociales et la taille des groupes de cachalots sont encore très mal connues (Huijser *et al.*, 2019) car peu étudiées.

Une des explications émises par Whitehead *et al.* (2012) pour expliquer les différences entre les groupes sociaux de l'Atlantique et du Pacifique réside dans la pression de prédation, les principaux prédateurs observés des cachalots étant les orques (*Orcinus orca*). Il existe également des observations d'attaque des cachalots par les orques dans l'Océan Indien, mais les préférences alimentaires de ces prédateurs dans ces eaux plus chaudes sont mal connues (Huijser *et al.*, 2019). L'équipe d'observateurs dont nous avons étudié les vidéos a de son côté observé des attaques de globicéphales tropicaux (*Globicephala melas*) et les nombreuses marques présentes sur le corps des membres de notre groupe social semblent accréditer la thèse d'une forte pression de prédation pouvant potentiellement justifier les regroupements.

La dynamique sociale des cachalots dans les unités est par ailleurs, en grande partie, modulée par la présence de veaux (Gero *et al.*, 2014). Notre groupe social est constitué de 12 juvéniles (jeunes et immatures) entre 2017 et 2019. L'étude de Gero *et al.* (2014a) et celle de Whitehead *et al.* (2012) mettent en avant un contraste important au niveau de la présence de veaux entre les unités sociales des eaux Dominicaines et du Pacifique. Il en découle qu'un des facteurs possibles menant à la formation de groupes sociaux stables sur le long terme est la présence de veaux dans une unité et le babysitting qui y est associé. Pour les populations des Caraïbes, Gero *et al.* (2014) auraient trouvé des preuves que les veaux font des tentatives d'allaitement jusqu'à 8 ans.

Notre sociogramme met en évidence 2 individus centraux dans les 2 potentielles unités sociales. D'une part, dans l'unité A, on retrouve Eliot (immature mâle) dont on peut se demander s'il ne jouerait pas un rôle de baby-sitter pour les jeunes. Ensuite dans l'unité B, c'est Germiné, une femelle adulte qui se positionne de façon centrale. On peut se demander si elle ne serait pas effectivement une gardienne ou nurse de l'unité. C'est une observation qu'a formulée notre équipe d'observateurs.

Le sociogramme montre également que l'intensité des liens mère-veau diminue au fur et à mesure que le jeune grandit. Certains jeunes ont cependant plus d'interactions avec des femelles qui ne sont pas leur mère, ce qui accrédite la présence de nurses ou baby-sitters. Il peut aussi y avoir des interactions intensives entre juvéniles du même âge. C'est le cas entre les immatures mâles Eliot et Tache Blanche, nés en 2011 et apparentés (demi-frères), mais aussi entre les jeunes Ali et Daren, nés en 2018 mais sans lien de parenté immédiat. L'âge peut-il être un critère d'association privilégiée, indépendamment de la parenté au 1<sup>er</sup> degré ?

Dans un groupe social, les cachalots ont tendance à s'associer préférentiellement avec les individus de leur propre unité (Christal et Whitehead, 2001). Lors de mélanges d'unités sociales, d'après Christal et Whitehead (2001), il existe des préférences d'associations pour les individus partageant une ascendance commune. Les recherches de Whitehead (2003, 2011) dans l'Atlantique et le Pacifique, mettent en évidence le fait qu'il existe des préférences dans la formation de groupes : des unités ne forment pas des groupes sociaux au hasard avec d'autres unités. Au sein des unités de cachalots, en revanche, Christal et Whitehead (2001) n'ont généralement trouvé aucune indication d'association préférentielle ou de position spatiale. Ils suggèrent l'existence de potentielles unités relativement instables ainsi que des unités plus petites et plus stables, mais dans ces deux types d'unités, il existe une certaine structure interne d'associations.

Il faut tout de même tenir compte du fait que les estimations de taille de groupes et d'unités sociales de cachalots effectuées par les différents auteurs cités ont été calculées en fonction du temps d'observation quotidien sur les cachalots et depuis un bateau. Alors que nous basons nos données sur des interactions impliquant des comportements sociaux décrits dans notre répertoire comportemental, établi à partir d'observation sub-surface.

## 3.2. Comportements sociaux et acoustiques

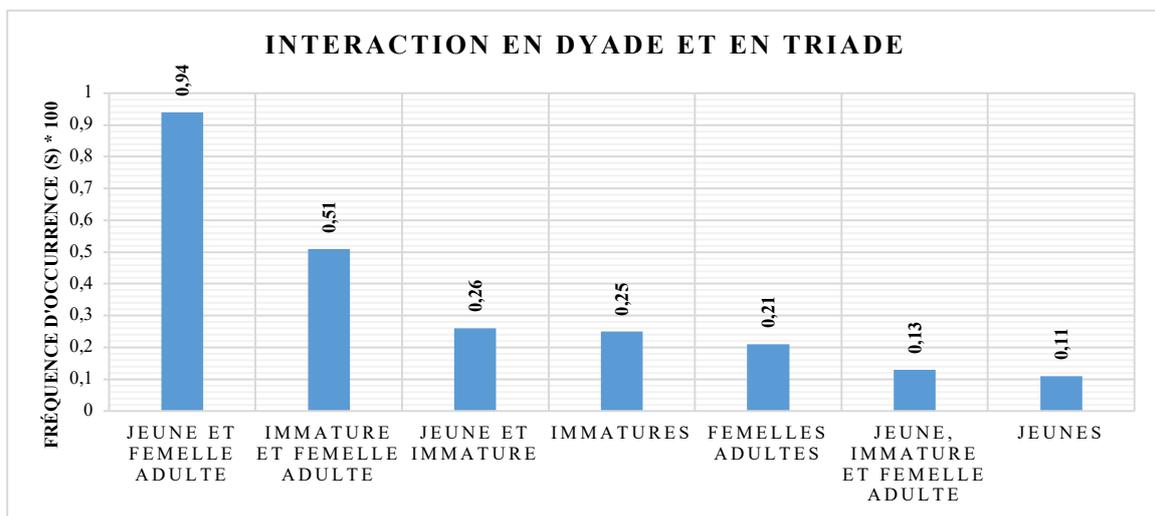
### 3.2.1. Comportements sociaux

Les cachalots passent généralement très peu de temps proches de la surface à l'exception des groupes sociaux constitués de femelles et de jeunes individus n'étant pas encore capables de plonger aussi profond et longtemps que les adultes. Ces jeunes restent en surface généralement accompagnés par un ou plusieurs autres membres du groupe pour les nourrir et les protéger lorsque les adultes plongent à la recherche de nourriture.

Nos analyses se sont focalisées sur les comportements de type interactions entre deux (dyades) ou trois (triades) individus membre de notre groupe d'étude. Nous avons tout d'abord tenté d'évaluer quelles étaient les interactions les plus fréquentes dans le groupe social étudié (fig. 11). Notre sociogramme (cfr. supra) nous permettait de visualiser les interactions entre membres du groupe et donc les liens entre individus. Cette fois, nous cherchons à mettre en évidence les interactions les plus observées entre classes d'âges et leur fréquence d'occurrence.

Pour ces analyses, il est nécessaire pour pouvoir faire différentes comparaisons de calculer la fréquence d'occurrence (en secondes) car, d'une part, le temps de présence ainsi que le temps d'observation de chaque individu varie et, d'autre part, les comportements étudiés peuvent se chevaucher et/ou se superposer à d'autres comportements. Il y a donc des possibilités de combinaisons entre comportements.

Rappelons que les trois classes d'âges étudiées sont les jeunes (0 à 3 ans), les immatures (4 à 9 ans) et les femelles adultes (supérieur à 9 ans).



**Figure 11.** Histogramme des fréquences d'occurrence des interactions entre individus en dyade ou en triade dans le groupe social étudié.

La figure 11 nous permet de voir les fréquences d'occurrence des interactions entre individus en dyade ou en triade en fonction des comportement sociaux de notre répertoire. On observe que la fréquence d'occurrence la plus élevée correspond à des interactions entre jeunes et femelles adultes (0,94), suivies des interactions entre immatures et femelles adultes (0,51). On peut voir également que les femelles adultes sont très peu observées en interaction en dyade ou en triade entre elles (0,21).

Ensuite, si on compare les interactions entre immatures (par paires ou en triade), on obtient une fréquence d'occurrence de 0,25, ce qui se rapproche beaucoup des interactions observées entre jeunes et immatures (0,26). La valeur la moins élevée (0,11) correspond aux interactions entre jeunes de 0 à 3 ans.

Les interactions les plus souvent observées correspondent aux interactions entre jeunes et femelles adultes. Cela peut sans doute s'expliquer par l'attention et les soins « parentaux » dont ont encore besoin les jeunes de 0 à 3 ans, qu'ils soient prodigués par leur mère ou une « nounou ».

On note cependant que les immatures (4 à 9 ans) ont eux aussi beaucoup d'interactions avec les femelles adultes. Autre constat : avant l'âge de 4 ans, les jeunes ont peu d'interactions entre eux. Au contraire des immatures entre eux et même des jeunes avec les immatures. Ceci suggère-t-il que les immatures peuvent eux aussi « s'occuper » des jeunes ?

Si l'on compare les interactions entre individus en fonction des deux unités sociales théoriques auxquelles ils appartiennent (cfr. supra), on constate que la fréquence d'occurrence des interactions entre individus immatures et femelles adultes est plus élevée (0,82) dans l'unité A que dans l'unité B (0,33). A l'inverse, on obtient un résultat nettement plus faible pour les interactions entre jeunes et femelles adultes dans l'unité A (0,41) que dans l'unité B (1,28). Les interactions entre immatures sont également assez élevées (0,63) dans l'unité A et inexistantes dans l'unité B (0). Cela correspond au fait que Roméo et Arthur, les 2 immatures de l'unité B, n'ont eu aucune interaction au cours de nos observations. Cependant, un test t a été effectué pour vérifier s'il y avait une différence significative entre les 2 unités au niveau de leurs interactions ; il montre qu'il n'y a pas de différence statistiquement explicable ( $p\text{-value} > 0,05$ ).

#### 3.2.1.1. Résultats par catégories

A l'aide du répertoire comportemental que nous avons élaboré, nous avons été en mesure de mettre en évidence les grandes catégories de comportements sociaux qui sont les plus effectués dans notre groupe social lorsque ses membres sont en interaction sous la surface.

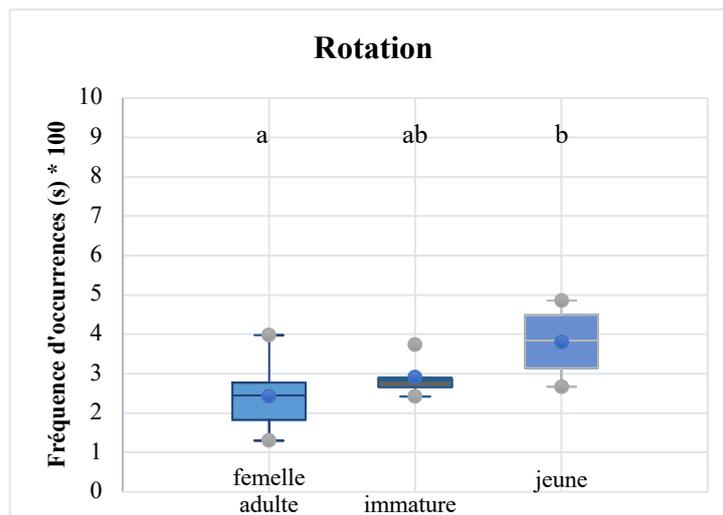
Pour rappel, nous avons répertorié 5 grandes catégories (Contact – Déplacement – Exploration – Rotation – Sexe sorti) que nous avons essayé de comparer malgré la différence du nombre de comportements répertoriés dans chaque catégorie. Il en ressort que les deux catégories ayant la fréquence d'occurrence la plus élevée sont les contacts (15,84) et les rotations (10,42), suivies de près par les déplacements (10,35), lorsqu'on regroupe ce qu'on a appelé les comportements combinés (à plusieurs actions).

Si l'on prend en compte les valeurs obtenues sans regrouper les comportements combinés, on obtient le même ordre de grandeur, c'est à dire d'abord contact puis déplacement et ensuite rotation, mais la 4<sup>ème</sup> catégorie de comportement la plus élevée en termes de fréquence d'occurrence correspond aux contacts combinés aux rotations. C'est pourquoi dans les analyses qui suivent, nous allons nous concentrer plus particulièrement sur les 2 grandes catégories que sont les contacts et les rotations. La catégorie « déplacement » étant constituée du comportement de nage accompagnée nous pensons que c'est ce comportement qui lui donne

une valeur si élevée. L'approche est un comportement difficile à étudier car il faut se concentrer sur les émetteurs – récepteurs du dit comportement, qui semblent extrêmement ambigus à distinguer. Nous avons donc décidé de ne pas aller plus loin pour ce comportement.

### 3.2.1.2. Catégorie « Rotation » : comportements de bascule et de vrille

Nous avons mis en évidence deux comportements, la bascule et la vrille, qui correspondent au fait que l'animal tourne sur lui-même. Nous nous sommes demandé si ces mouvements dans l'espace, qui semblent particulièrement difficiles à effectuer par un animal d'une telle corpulence, pouvaient l'être par toutes les classes d'âges. D'autant que nous avons pu voir que cette catégorie de comportement était très observée.



**Figure 12.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence (en seconde) des comportements de rotation en fonction des classes d'âge.

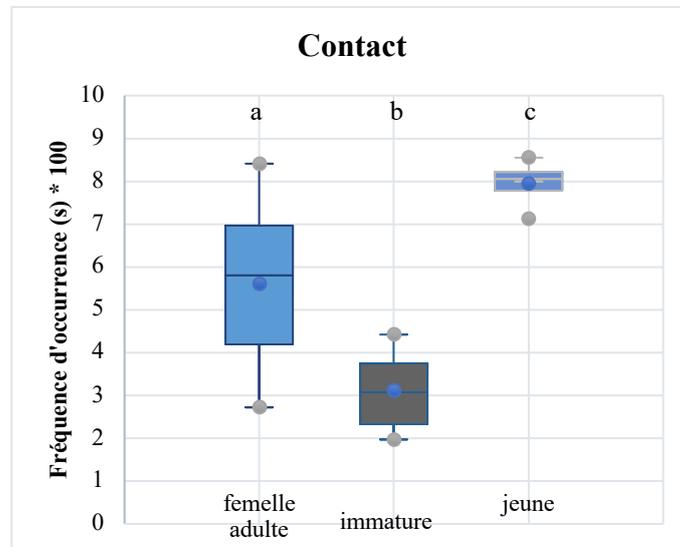
La moyenne des fréquences d'occurrence pour les rotations est la plus élevée pour les jeunes (3,80), puis pour les immatures (2,91) suivis de près par les femelles adultes (2,42). En revanche, on remarque que les écarts-types entre les jeunes et les femelles adultes sont très proches (0,99 et 0,90 respectivement) alors qu'il n'est que de 0,50 pour les immatures.

D'après le test de Shapiro-Wilk, les données suivent une loi normale ( $p$ -value  $>$  à 0,05, voir annexe 2), on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle. Ensuite, l'analyse de la variance donne une  $p$ -value de 0,057, ce qui n'est pas significatif mais la valeur reste très proche de la significativité. La significativité entre nos 3 modalités (jeune, immature et femelle adulte) a donc été testée. On peut voir sur la figure 12 à l'aide des lettres « a » et « b » quelles modalités sont significatives avec quelles modalités. De manière significative, les jeunes effectuent plus de rotations que les femelles ( $p$ -val = 0,02) mais pas que les immatures ( $p$ -val = 0,33). Les résultats entre femelles adultes et immatures ne sont pas non plus significatifs ( $p$ -val = 0,13).

### 3.2.1.3. Catégorie « Contact »

Cette catégorie est celle dont nous avons décrit le plus de comportements. En effet, nous avons distingué 13 comportements de contacts au total : dos – dos, dos – ventre, ventre – ventre, ventre – latéral, latéral – latéral, latéral – dos, tête – corps, tête – tête, queue – corps, queue – queue, mandibule – mandibule, mordre et enfin tête – fente génitale. Tous ces comportements relatent le fait qu'un individu A touche un individu B au niveau de la partie du corps explicitée dans le nom du comportement pour la plupart.

Au départ, nous avons voulu voir quelle est la classe d'âge qui a la fréquence d'occurrence la plus élevée. Ces interactions nécessitant le contact entre 2 ou 3 individus sont reprises dans la figure 13 pour mettre en évidence quelle classe d'âge est susceptible d'avoir le plus de contacts avec autrui, ceci étant mesuré par la fréquence d'occurrence (en secondes).

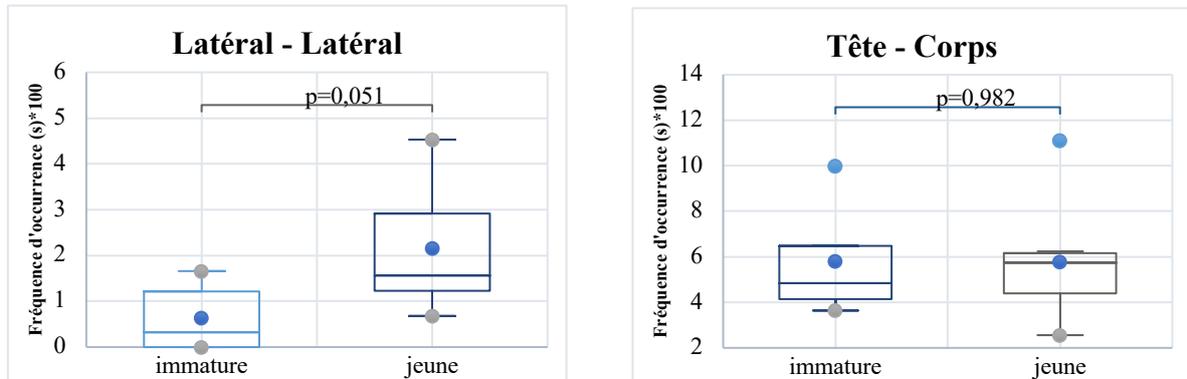


**Figure 13.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence de la catégorie contact en fonction des classes d'âges.

La moyenne des fréquences d'occurrence pour les contacts est la plus élevée pour les jeunes (7,94 ; SD = 0,99), suivis par les femelles adultes (5,61 ; SD = 0,90) puis par les immatures (3,11 ; SD = 0,50). La distribution des données suit une loi normale ( $p$ -value > 0,05, annexe 2), nous avons donc effectué une analyse de la variance (ANOVA). On obtient des valeurs significatives entre les femelles adultes et les immatures (0,02), ensuite entre les femelles adultes et les jeunes (0,037) et pour finir entre les jeunes et les immatures (0,001). Il y a donc des différences significatives entre les 3 classes d'âges pour les comportements de contact. Il est donc intéressant d'aller plus loin dans l'analyse. Nous avons vérifié s'il y avait des différences significatives entre les jeunes et les immatures pour chaque comportement de contact et également s'il y avait des différences entre juvéniles mâles et femelles.

Pour tous les contacts, un test de Shapiro-Wilk a été effectué, seuls les comportements dos – ventre ; latéral – latéral ; tête – corps ; tête – tête et tête – fente génitale suivent une loi normale ( $p\text{-value} > 0,05$ ). Un Test T a donc été réalisé sur ces 5 comportements.

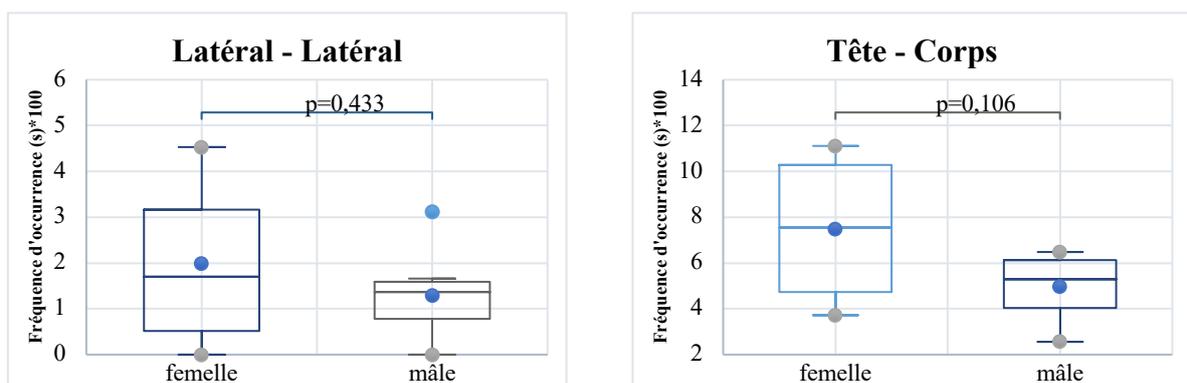
Les boîtes à moustaches ci-dessous nous permettent de voir s'il y a une différence significative entre les individus immatures et jeunes (fig. 14).



**Figure 14.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Latéral – Latéral et Tête – Corps en fonction des individus immatures et jeunes.

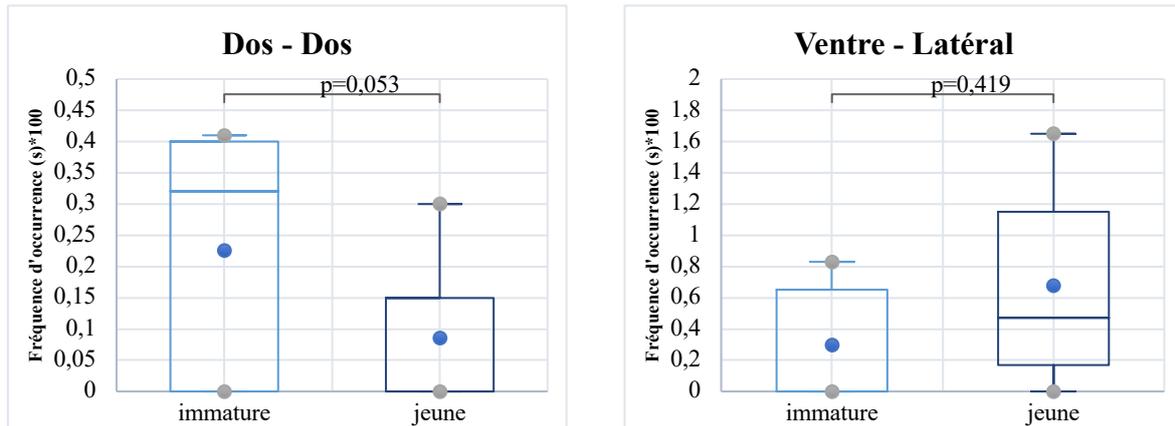
Les résultats obtenus pour le test t indiquent qu'il n'y aucune différence significative pour les 5 comportements étudiés entre immatures et jeunes en fonction de leur fréquence d'occurrence par individu. Cela pourrait indiquer que la moyenne des fréquences d'occurrence de ces différents comportements de contact est plutôt similaire entre ces 2 classes d'âge. On observe cependant que pour le comportement latéral – latéral et le comportement de tête – fente génitale, les valeurs sont très proches de la significativité.

Si on compare maintenant ces 5 comportements en fonction du sexe des individus, on constate qu'il n'y a pas non plus de différence significative puisque toutes nos p-values sont supérieures à 0,05 (voir annexe 2).



**Figure 15.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Latéral – Latéral et Tête – Corps en fonction du sexe des juvéniles.

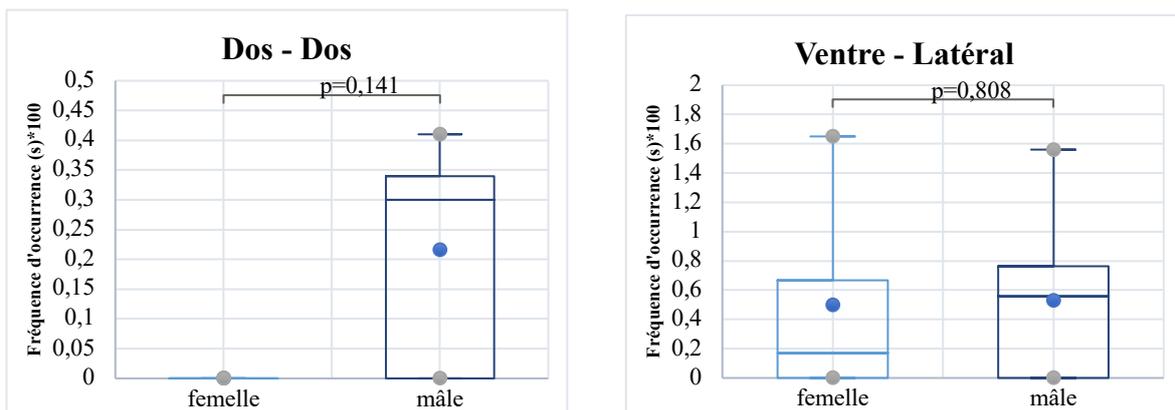
Pour les comportements mordre, dos – dos, ventre – ventre, ventre – latéral, latéral – dos, mandibule – mandibule, queue – corps et queue – queue, un test de Mann-Whitney a été réalisé.



**Figure 16.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Dos – Dos et Ventre – Latéral en fonction des individus immatures et jeunes.

Il n'y a pas non plus de résultats significatifs pour ces 8 comportements de contacts. Le seul comportement proche de la significativité est le comportement dos – dos à 0,053.

Si nous comparons ces 8 comportements maintenant en fonction du sexe des individus juvéniles, aucun résultat n'est significatif non plus.



**Figure 17.** Boîtes à moustache des fréquences d'occurrence des comportements de contacts Dos – Dos et Ventre – Latéral en fonction du sexe des juvéniles.

Cependant, si on compare les comportements de contacts entre les juvéniles mâles et femelles, on constate que plusieurs de ces comportements tactiles n'ont jamais été observé lors d'interaction avec une femelle. En effet, les contacts mordre, dos – dos et mandibule – mandibule ont des valeurs de fréquences d'occurrence de 0 pour les 4 juvéniles femelles (3 jeunes et 1 immature).

Les 3 comportements effectués le plus souvent chez ces femelles semblent être le contact tête – corps, queue – corps et tête – fente. Ce sont également ces 3 comportements qui ont été le plus souvent observés chez les juvéniles mâles. Ces différents comportements de contacts ont été particulièrement observés lors d’interactions entre un jeune et sa mère.

#### 3.2.1.4. Comportement de sexe sorti

La catégorie de comportement que nous avons appelé « sexe sorti » vise à mieux comprendre l’évolution des démonstrations sexuelles des juvéniles mâles mais également à déterminer si ce comportement peut être lié à l’exclusion des mâles de leur groupe social. Dans les unités sociales de cachalots composées de femelles adultes et de juvéniles mâles et femelles, les femelles passent généralement toute leur vie dans la même unité sociale ou en tout cas dans le même groupe social. En revanche, ce n’est pas le cas des mâles puisque vers l’âge de 6 ans, ils quittent leur unité (Goddard, 2015 ; Rendell et Whitehead, 2003).

Deux de nos individus considérés comme des mâles immatures, Eliot et Tache Blanche, font encore partie du groupe social alors qu’ils ont atteint presque 10 ans. Lors de nos analyses, en 2019, 4 immatures (Arthur, Eliot, Roméo et Tache Blanche) ont dépassé l’âge de 6 ans. Nous avons pourtant continué à observer des interactions entre ces individus et les autres individus du groupe social.

En ce qui concerne le comportement de sexe sorti, seul un individu de notre groupe social a effectué ce comportement. Il s’agit de Eliot, un immature mâle, dont on a observé ce comportement sur les 3 années de recherches et lors d’interaction avec tous types de classes d’âges et de sexe. Ce comportement n’a été observé chez aucun autre juvénile mâle du groupe social. En revanche, lors des courtes observations d’interactions entre les membres de notre groupe social et des mâles adultes extérieurs au groupe, 2 d’entre eux sur les 4 observés ont effectué ce comportement.

En outre, en calculant les fréquences d’occurrences du comportement de sexe sorti pour Eliot sur 3 ans, on obtient qu’entre 6 et 7 ans (année 2017), la fréquence d’occurrence de sexe sorti d’Eliot est de 0,17, puis de 0,70 entre 7 et 8 ans et finalement, entre l’âge de 8 et 9 ans, Eliot a sorti son sexe pour une fréquence d’occurrence de 4,09. On observe donc une nette augmentation de la fréquence d’occurrence en secondes quand l’individu prend de l’âge.

### 3.2.2. Comportements acoustiques

Les vocalises jouent un rôle important dans les différents comportements des cachalots. L'objectif de l'étude acoustique vise au départ à savoir à quelle occurrence les cachalots de notre groupe social émettent des sons lors des comportements sociaux répertoriés. Il s'agit ensuite de déterminer quels types de vocalises sont les plus présents lors de ces interactions et, enfin, de déterminer la composition des structures de codas du groupe social.

Notre analyse des comportements a permis de mettre en avant le fait que, pendant 79% du temps d'interactions entre cachalots en dyade ou en triade, le groupe social émettait des sons de divers types. Dans ces 79% de présence de vocalises, nous avons réussi à identifier 49 % des structures des vocalises. Les 30% restant correspondent à des sons trop difficiles à identifier, par exemple à cause de superpositions ou de chevauchements qu'on a qualifiés de cacophonie.

#### 3.2.2.1. Les clangs ou clics lents

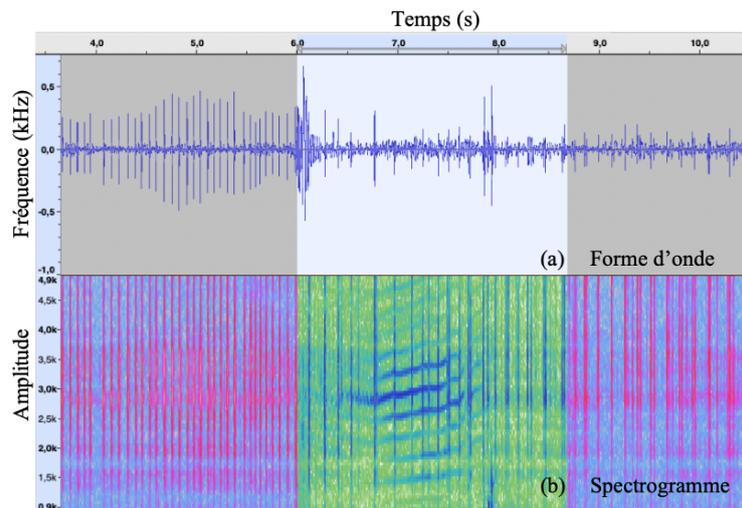
Les clangs représentent moins de 1% de l'ensemble des vocalisations des cachalots et seraient spécifiques aux mâles adultes (Oliveira *et al.*, 2013), qui produisent des clics lents, également appelé clangs. Ils sont généralement constitués de 10 à 15 clics sur une durée pouvant aller au-delà d'une minute, sous forme de trains de clics et générant un son métallique (Goddard, 2015 ; Oliveira *et al.*, 2013). Nous avons enregistré au total 153 vocalises associées à des clangs mais nous n'irons pas plus loin dans leur analyse. D'une part parce qu'ils sont spécifiques aux mâles adultes alors que nous étudions un groupe de femelle avec leurs juvéniles. D'autre part, la durée moyenne des vidéos sous-marines constituant notre jeu de données est de 2 minutes, il est donc difficile de connaître l'occurrence exacte ainsi que leur structure car leur durée peut dépasser la minute.

#### 3.2.2.2. Les clics (ou clics isolés)

Le nombre total d'occurrences des clics isolés enregistrés correspond à 84 dans notre échantillon. Ce chiffre n'est pas suffisant pour nous permettre d'aller plus loin dans leur analyse. Notons que les clics isolés sont souvent écartés des analyses acoustiques effectuées par d'autres chercheurs chez les cachalots (cfr. supra).

### 3.2.2.3. Les miaulements

D'après Madsen *et al.* (2003), les jeunes cachalots sont capables de produire un type de son appelé « grognement » caractérisé par une basse fréquence et de faible niveau sonore mais dont le rôle n'est pas connu. Leur particularité vient du fait qu'ils ne sont pas produits au niveau des lèvres du museau de singe (cfr. supra) mais au niveau du sac aérien frontal (Goddard, 2015). La question est de savoir si ces grognements pourraient correspondre à ce que nous appelons les miaulements. En effet, les miaulements n'ont pas la même structure multi pulsée que les autres types de vocalises (fig. 18). Ce sont des sons très particuliers, ressemblant à des miaulements de chats, qu'on appellerait également les « trumpet calls », mais ils sont encore très mal connus.



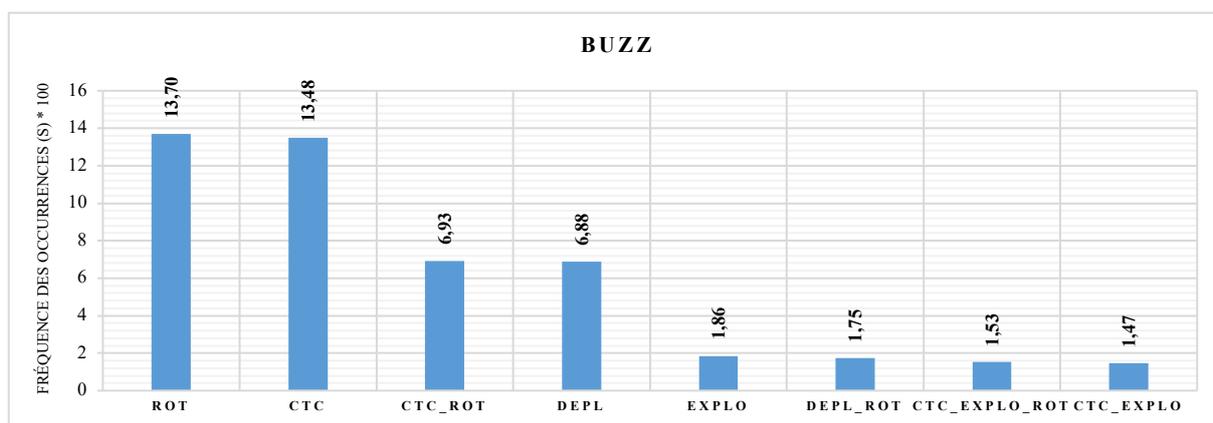
**Figure 18.** Représentation d'un miaulement d'une durée d'1 seconde, chevauché à d'autres structures de clics, sur Audacity.

Lors de nos observations, nous avons enregistré seulement une occurrence de miaulement lors d'une interaction en triade constituée des individus Germine (femelle adulte), Miss Tautou et Lana (2 jeunes femelles) le 5 avril 2019. Les différents comportements sociaux enregistrés lors de l'interaction sont une tête – fente génitale entre Germine et Lana, Germine a en même temps effectué une bascule et Miss Tautou une ouverture/fermeture de bouche. D'autres sons ont été enregistrés, chevauchant le miaulement, il s'agissait d'un buzz et d'un clic régulier. Ces informations ne nous permettent pas d'aller plus loin dans notre analyse des miaulements. Malgré tout, lors du premier tri de nos données, nous avons constaté plusieurs miaulements lors d'interaction entre au moins une dizaine d'individus. C'est un son atypique et rare qui mériterait une attention particulière, dans une future recherche.

#### 3.2.2.4. Les buzz (ou « creaks »)

Les buzz, appelés aussi « creaks », sont identifiables par leur soudaine augmentation du taux de répétition d'environ 50 clics par secondes (Madsen *et al.*, 2002b). Leur niveau sonore est plus faible, rendant leur portée plus courte que les clics réguliers mais leur directionnalité est élevée, les rendant adaptés à l'écholocalisation lors des plongées (Goddard, 2015). D'après Goddard (2015), ces clics ne sont pas utilisés ni observés lorsque les cachalots sont dans un contexte d'interaction sociale et lorsqu'ils se trouvent à la surface. Leur utilisation aurait lieu quand les cachalots ont un comportement de recherche de nourriture (Madsen *et al.*, 2002b).

Or, nous avons constaté que ce son est l'un des plus observés lors des interactions (200 occurrences) entre membres du groupe étudié, donc en l'absence de comportement lié à la recherche de nourriture.



**Figure 19.** Histogramme des fréquences d'occurrence des buzz en fonction des différentes catégories de comportements. CTC = contact ; DEPL = déplacement ; EXPLO = Exploration ; ROT = rotation.

Malgré l'impossibilité de faire des liens entre sons et individus, nous avons remarqué que lors des interactions entre individus, les comportements les plus fréquents en présence de buzz sont les rotations (13,70), puis les contacts (13,48) (fréquence d'occurrence la plus élevée), et enfin les rotations et contacts combinés (6,93).

#### 3.2.2.5. Les clics réguliers et les codas

Dans la littérature, les clics réguliers et les codas sont pris en considération pour définir si les groupes et/ou les unités sociales font partie d'un même clan (Mohl et Whitehead, 2003). Les différentes structures de clics sont regroupées et appelées codas, considérant que ces codas peuvent avoir des séquences de clics stéréotypées allant de 3 à 40 clics (Huijser *et al.*, 2019).

Dans notre analyse nous faisons une distinction entre les clics réguliers et les codas, considérant qu'ils apparaissaient dans des circonstances différentes.

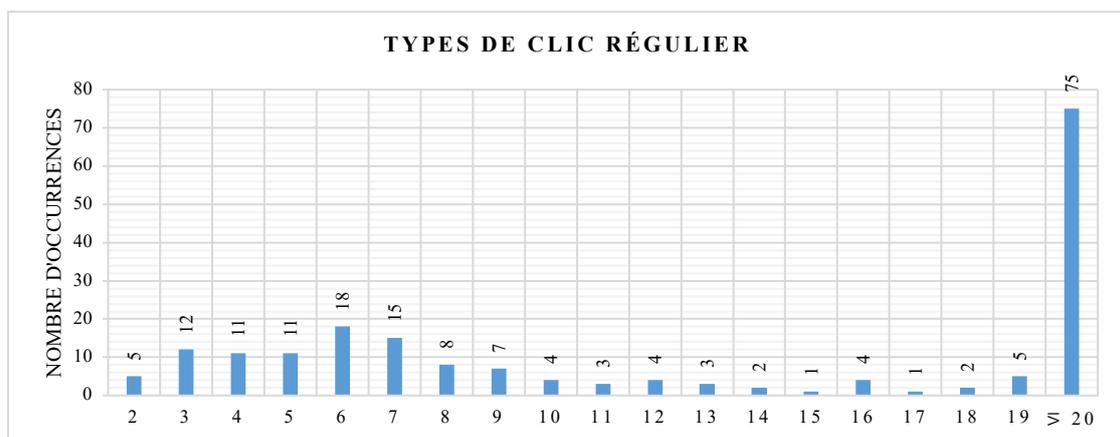
Au cours des analyses vidéo, nous avons réussi à identifier 191 clics réguliers et 464 codas. Les clics réguliers ont généralement un ICI allant de 0,5 à 1 seconde alors que les codas ont un ICI allant de 0,1 à 0,5 secondes. Mais sur les 191 clics réguliers, nous n'avons pu déterminer la structure de 75 d'entre eux, considérant que lorsqu'un clic régulier était supérieur ou égal à 20 clics, nous ne précisons pas la structure en détail faute de disposer de la séquence complète.

La plupart des chercheurs écartent par ailleurs de leurs études les codas ayant une séquence de 2 ou plus de 13 clics. D'abord parce que leur occurrence est très faible, mais aussi, surtout, parce qu'ils sont particulièrement difficiles à distinguer en présence d'autres vocalises.

Pour notre étude, nous avons pris en considération toutes les structures de codas mais en revanche, nous n'avons pas classé les codas par leur ICI absolu pour avoir une information sur la durée car cela nécessiterait une étude à part entière. Les codas étant par ailleurs généralement très courts, il était difficile pour nous d'établir un potentiel lien avec nos comportements sociaux calculés par seconde.

#### 3.2.2.5.1. Les clics réguliers

Dans cette partie, nous considérons les clics réguliers qui sont émis dans une séquence temporelle et qui ne sont pas suivis par des codas. D'après Oliveira *et al.* (2013), les clics réguliers (ou usuels) sont les sons les plus communs chez les cachalots puisqu'ils représentent 61% des clics produits – même si nous en avons trouvé proportionnellement moins que les codas lors de notre étude. Les clics réguliers ont une fonction d'écholocation, étant émis lors des plongées profondes pour scanner ce qui se situe en avant du cachalot pour la recherche de proies (Goddard, 2015 ; Madsen *et al.*, 2002a ; Mohl *et al.*, 2000). D'après Madsen *et al.* (2002b), ces sons ont un niveau sonore très puissant ainsi qu'une directionnalité élevée, les rendant détectables jusqu'à 16km de distance.



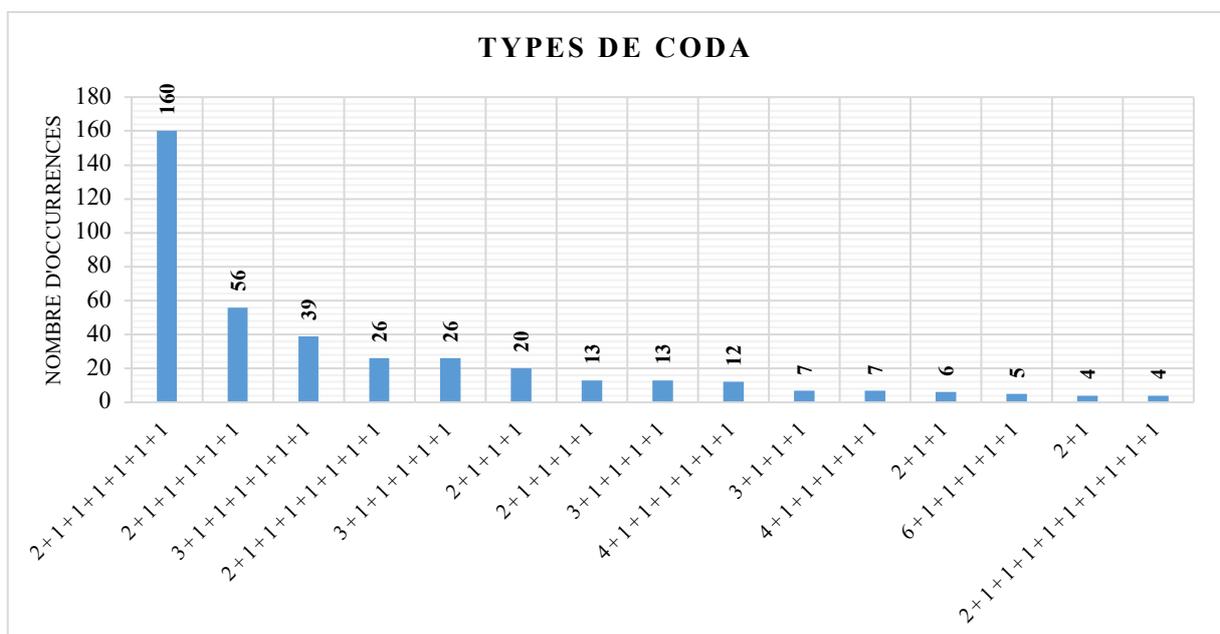
**Figure 20.** Diagramme en barres des structures de clics réguliers identifiées en fonction de leur nombre d'occurrences.

Les trois structures les plus émises sont les structures  $\geq$  à 20 clics ( $\geq$  20R, n=75), à 6 clics (6R, n=18) et à 7 clics (7R ; n=15).

### 3.2.2.5.2. Les codas

Les codas sont enregistrées principalement en présence de groupes de femelles, leur mécanisme de production du son est différent avec une directionnalité, un niveau sonore et une fréquence plus faibles que les clics réguliers (Goddard, 2015). On suppose que ce type de clics a une fonction dans la communication (Goddard, 2015). En effet, un rôle qu'on leur attribue est le maintien d'une certaine cohésion sociale dans un groupe, permettant de mettre en place une défense commune et un partage des soins aux juvéniles (Rendell et Whitehead, 2003). Les séquences de codas permettraient une communication entre cachalots (Goddard, 2015) et il existe différents types d'échanges de codas (Schulz *et al.*, 2008). La production de 2 séquences de codas par 2 individus différents à quelques secondes d'intervalle caractérise un échange pouvant être chevauchant ou adjacent selon le moment où commence la seconde coda (Schulz *et al.*, 2008). Les vocalises sont particulièrement importantes chez les cachalots puisque leur contact visuel est limité (Schulz *et al.*, 2008). La communication au moyen des échanges de codas leur permettraient de localiser un congénère, de coordonner les mouvements de groupe mais également de maintenir des relations sociales (Schulz *et al.*, 2008).

Dans ces 464 codas, nous avons identifié 48 structures différentes (fig. 21).

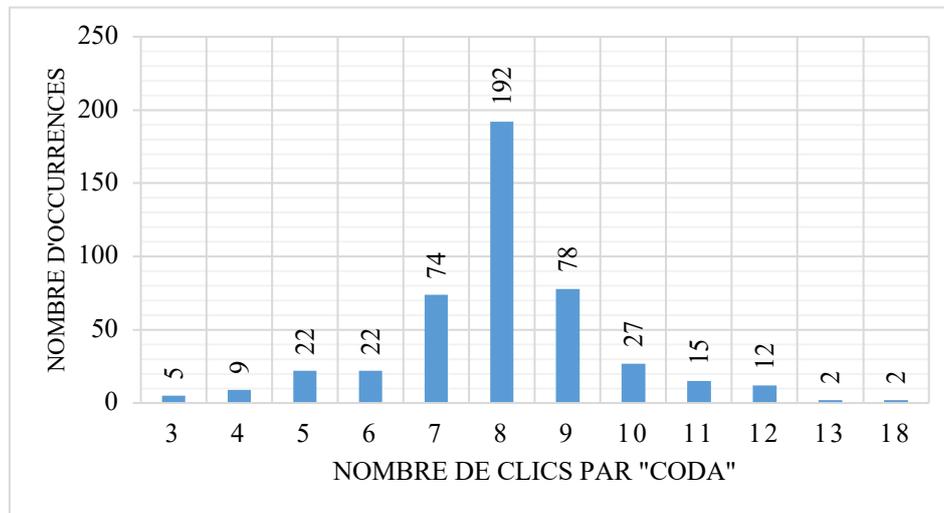


**Figure 21.** Diagramme en barres des structures de codas identifiées en fonction de leur nombre d'occurrence.

Par soucis de lisibilité, seules les structures de codas identifiées 4 fois ou plus sont représentées.

Les trois structures les plus émises sont les structures « 2+1+1+1+1+1 » (n=160), « 2+1+1+1+1 » (n=56) et « 3+1+1+1+1+1 » (n=39).

Nous avons également calculé le nombre de clics composant ces codas (fig. 22) indiquant que les codas à 8 clics dominent la distribution (n=192), suivis des codas à 9 clics (n=78) et à 7 clics (n=74).



**Figure 22.** Diagramme en barres des nombres de clics par coda émise.

Les résultats suggèrent que les codas à 8 clics sont spécifiques au groupe social étudié. La structure interne de la coda « 2+1+1+1+1+1 » pourrait être considérée comme la signature vocale de notre groupe social et définir ce clan acoustique. De plus, la fréquence par modalité a été calculée pour essayer de comparer les vocalises émises par l'unité sociale A et l'unité sociale B (cfr. supra) lors des interactions, donnant une fréquence pour cette coda spécifique de 43% pour l'unité A et 41% pour l'unité B. Ce qui tendrait également à confirmer que ces deux unités appartiennent au même clan.

Ensuite, nous avons tout de même voulu tester si certains comportements sociaux peuvent être mis en relation avec des structures de codas particulières. Ces résultats sont à prendre avec grande précaution puisque comme expliqué précédemment, nous ne sommes pas en mesure de savoir qui est l'individu émetteur du son. A partir du croisement des données comportementales et des structures de codas identifiées, un tableau de contingence a été mis en place. Un filtrage a été effectué pour retirer tous les croisements observés moins de 5 fois. Pour finir, il reste au total 6 structures différentes de codas et 15 comportements (tab. 7). Ensuite, chaque comportement a été associé à sa catégorie pour voir si des estimations plus larges peuvent se faire.

Catégories	Comportements	Structures de coda					
		2+1+1+1+1+ 1+1	2+1+1+1+1+ 1+1+1	2+1+1+1+1	2+1+1+1+1+ 1+1+1+1	3+1+1+1+1+ 1+1	3+1+1+1+1+ 1+1+1
<b>Contact</b>	Dos-Dos	-0,392	<b>1,150</b>	-0,650	0,258	-0,795	-1,072
<b>Contact</b>	Dos-Ventre	-0,509	<b>1,734</b>	-1,452	0,068	-0,654	-1,562
<b>Contact</b>	Dos-Ventre.Queue-Corps	-1,620	-0,733	-0,866	<b>2,239</b>	0,825	1,371
<b>Contact</b>	Latéral-Latéral	-1,281	-0,468	-0,685	-0,927	<b>6,317</b>	-1,130
<b>Exploration</b>	Ouverture/Fermeture de bouche	0,594	-0,612	-0,781	-0,111	0,090	<b>1,041</b>
<b>Contact</b>	Queue-Corps	-0,500	<b>1,312</b>	-0,685	-0,927	-0,839	-0,244
<b>Contact</b>	Queue-Queue	0,299	0,734	-0,992	-1,343	-1,215	<b>0,807</b>
<b>Contact</b>	Tête-Corps	2,199	-3,098	0,116	1,853	-1,156	<b>2,939</b>
<b>Contact</b>	Tête-Fente	-0,347	-2,260	<b>2,265</b>	0,955	2,074	1,195
<b>Contact</b>	Ventre-Ventre	0,600	-2,010	-0,612	<b>6,407</b>	-0,750	-1,010
<b>Déplacement</b>	Approche	-0,546	0,953	-1,225	-1,658	<b>1,167</b>	-0,041
<b>Déplacement et Rotation</b>	Approche.Vrille	-0,500	<b>0,867</b>	-0,685	-0,927	0,354	-0,244
<b>Rotation</b>	Bascule	<b>2,873</b>	-0,838	-0,750	-0,031	-0,919	-0,429
<b>Déplacement</b>	Nage accompagnée	0,383	0,521	<b>1,552</b>	-1,226	-1,435	-0,339
<b>Rotation</b>	Vrille	-0,441	0,646	<b>1,650</b>	-0,783	-0,674	-0,643

**Tableau 7.** Résidus du test  $\text{Khi}^2$  effectué lors du croisement entre comportements et structures de codas.

Le test du  $\text{Khi}^2$  effectué sur ce tableau a mis en évidence un écart à l'indépendance significatif ( $p\text{-value} < 0,0001$ ), donc la possible existence d'une liaison entre les comportements observés et les codas émises. Les résidus positifs expriment un écart à l'indépendance. Si on regarde ligne par ligne, on peut potentiellement associer un comportement social à une structure de coda, par exemple on observe que le comportement de « bascule » semble être associé à la coda « 2+1+1+1+1+1 » (résidu = 2,873). Pour ce comportement de la catégorie des rotations, on voit que les résidus en lien avec d'autres codas sont tous négatifs. Pour cette structure de coda, un autre comportement, tête – corps obtient une valeur de résidu assez proche (2,199). Il est donc difficile de faire un réel lien entre cette structure de coda et un comportement observé spécifique. A noter tout-de-même que 2 des résidus les plus élevés correspondent à une association comportement-coda de contact ventre-ventre avec la structure 2+1+1+1+1+1+1+1 (résidu = 6,407) et de contact latéral-latéral avec la structure 3+1+1+1+1+1 (résidu = 6,317).

### 3.2.3. Discussion et limites

Les comportements sociaux des cachalots, nous l'avons dit, sont très mal connus. Seuls les comportements aériens ont réellement été décrits alors que le cachalot est une espèce effectuant très peu ce genre de comportement (cfr. supra). En abordant notre étude qui porte pour la première fois sur des interactions filmées en sub-surface, nous avons peu de références comportementales auxquelles nous référer pour effectuer des comparaisons et vérifier la pertinence des résultats obtenus. En outre, les populations de cachalots de l'île Maurice n'ont été étudiées que dans de rares publications, il nous était donc difficile de savoir comment utiliser efficacement nos données.

D'autre part, la taille de notre échantillon (groupe social) ne nous permet pas d'aller aussi loin que nous le voudrions dans les analyses. D'une part parce que le nombre d'individus par classe d'âge est finalement assez bas, il est donc difficile d'extrapoler à partir de données peu abondantes. Il faudrait pouvoir comparer nos observations à d'autres groupes ou unités sociales. Vu la faiblesse de notre échantillon, la plupart des tests statistiques effectués pour corroborer nos données n'ont pas été significatif. Il est donc difficile de tirer des conclusions définitives.

Sur base des observations aériennes et acoustiques disponibles, Goddard (2015) estime que le comportement de socialisation des cachalots correspond à toutes les interactions directes ou indirectes accompagnées de vocalisations entre individus. Selon les observations, les cachalots peuvent adopter ce type de comportement autant le matin que l'après-midi. Il arrive qu'ils socialisent le matin en surface par exemple et plongent en profondeur l'après-midi pour s'alimenter (Goddard, 2015 ; Whitehead, 2003). La communication par l'émission de codas (cfr. infra) entre individus est une des caractéristiques de la socialisation, puisque la structure des codas donnerait des informations sur l'individu et sur son appartenance à un clan (Goddard, 2015 ; Rendell et Whitehead, 2003).

Nos résultats ont effectivement montré que 79 % des temps d'interactions enregistrés avaient lieu en présence de vocalises, même si nous ne pouvions en connaître le ou les émetteurs ni prouver un lien entre les auteurs des interactions et des sons. Précisons que les deux types de vocalises dont nous avons enregistré le plus d'occurrence correspondent aux codas et aux buzz qui semblent être les sons les plus associés aux interactions entre individus en dyade et en triade.

En ce qui concerne les buzz, même si ce n'est pas confirmé statistiquement, on peut déduire de nos analyses :

1. que les buzz n'accompagnent pas uniquement les plongées mais également des comportements sociaux, contrairement à ce que la littérature affirmait jusqu'ici. D'après Whitehaed (2003) en effet, la fonction principale des buzz est assignée à l'écholocalisation proche en phase de recherche de nourriture.
2. il ressort de nos observations que ces types de vocalises sont plus fréquemment liés à des interactions de type rotations et contacts, qui n'ont pas de lien avec la chasse.

A propos des codas, nos résultats suggèrent que les codas à 8 clics sont spécifiques au groupe social étudié. La structure interne de la coda « 2+1+1+1+1+1+1 » pourrait être considérée comme la signature vocale de notre groupe social et définir ce clan acoustique. De plus, les résultats montrent une similarité entre les structures de codas émises par les membres de nos deux unités sociales, ce qui tendrait également à confirmer que ces deux unités appartiennent au même clan. Quant à associer l'émission de codas à certains types de comportements sociaux spécifiques, malgré certains résultats statistiques intéressants, ils sont finalement disparates pour être réellement significatifs. Il nous faudrait plus de données et, surtout, pouvoir assigner le son aux individus.

Les cachalots vivent dans des sociétés à plusieurs niveaux. Si les unités sociales de cachalots partagent un répertoire de codas (et de clics réguliers) commun, alors on dira qu'ils font partie d'un même clan (Amorin *et al.*, 2020). Pour pouvoir quantifier la similarité entre les répertoires et mettre en avant le clan d'appartenance, il est nécessaire d'analyser les intervalles inter-clics des codas mais également la prédominance de structures de codas particulières entre différentes populations, groupes ou unités sociales (Amorin *et al.*, 2020). L'étude de la distribution des clans dans les populations de cachalots sert en particulier à mieux comprendre la transmission culturelle entre ces dites populations (Amorin *et al.*, 2020).

Nous ne sommes pas capables de dire à quel clan notre groupe social appartient pour deux raisons principales. Premièrement, nous n'avons pas calculé les intervalles inter-clics des codas que nous avons répertoriés car ceci constituerait une recherche à elle seule (une autre équipe travaillant sur les mêmes enregistrements vidéo le fait d'ores et déjà, le but étant ensuite de faire le lien entre la taille des IPI et des potentiels clans avec l'étude éthologique que nous avons mise en place).

Deuxièmement, il aurait fallu étudier plusieurs groupes sociaux, plusieurs populations distinctes. Et troisièmement, nous sommes dans l'incapacité de savoir quel est l'individu émetteur des sons que nous analysons.

Enfin, pour ce qui concerne les comportements sociaux, deux types d'interactions ont été plus particulièrement observés : des contacts et des rotations. Les contacts les plus fréquents dans notre groupe social sont de type : tête – fente génitale ; tête – corps ; queue – corps ; queue – queue ; latéral – latéral. On a pu voir des différences significatives dans les fréquences d'occurrence des contacts entre femelles adultes, jeunes et immatures, mais quand on essaie d'aller plus loin dans l'analyse statistique des comportements de cette catégorie, on n'obtient aucun résultat significatif.

Plusieurs raisons peuvent expliquer le manque de significativité des moyennes de fréquences d'occurrence des comportements de contact entre jeunes et immatures : il y a beaucoup de différences de comportements inter-individu et notre jeu de données n'est pas suffisant pour montrer une significativité. Il aurait fallu pouvoir analyser cela sur plus d'individus mais notre groupe sociale à un nombre de juvéniles assez restreint. Le fait d'étudier les contacts par type de contact diminue le jeu de données et par ailleurs les tests statistiques utilisés vérifient les différences significatives par rapport aux moyennes, nous perdons ainsi les valeurs extrêmes, les particularités inter-individu.

En revanche, l'analyse de la variance a pu mettre en évidence une différence significative entre les femelles adultes et les jeunes pour la catégorie de comportement de rotation incluant les bascules et les vrilles. Les jeunes effectuent plus de rotations que les femelles adultes et que les immatures, et ce de manière significative. Malgré tout, il faut prendre ce résultat avec des pincettes puisqu'au départ la p-value était très légèrement supérieure à 0,05. Notre première idée en étudiant les rotations était que, potentiellement, plus l'individu est âgé plus il effectue des comportements qu'on pourrait qualifier de complexes, dans le sens où cela demande de l'énergie, une certaine vision de l'espace, etc. Ces résultats indiquent pourtant que dès leur plus jeune âge, les cachalots sont capables de certaines « prouesses acrobatiques ».

## 4. Conclusion et perspectives

A travers cette recherche, nous tentons de répondre à différentes hypothèses mais surtout de faire une étude descriptive d'un groupe social pour fournir de nouvelles informations sur le comportement en surface des cachalots. Nos cachalots étant observés dans cette zone depuis plusieurs années, cela suggère qu'il s'agit de l'habitat privilégié de ce groupe social, rendant ce groupe potentiellement vulnérable aux perturbations locales ou à la dégradation de l'habitat. (Confirmer avec Gero *et al.*, 2014 ; Barteneva, 2020)

L'intérêt ensuite serait de pouvoir comparer nos observations avec celles concernant d'autres populations et groupes sociaux de la région et d'ailleurs dans le monde. Il semble important de faire ce lien pour l'étude de ces cétacés puisqu'il reste rare d'avoir des données d'observation des individus au fil du temps pour l'obtention de détails de leur comportement social, acoustique et des interactions entre individus.

Malgré tout, dans cette étude, il ne figure pas de comparaison avec d'autres unités sociales de la région qui pourrait venir renforcer ou montrer une variation dans les comportements observés. C'est une prochaine étape qu'il serait intéressant de creuser puisque l'on sait déjà qu'il existe bel et bien d'autres groupes sociaux de cachalots au large de l'Île Maurice.

Huijser *et al.* (2019) avaient déjà montré la présence d'unités sociales pouvant s'agréger en groupes plus importants à Maurice, suggérant que la structure sociale des cachalots est plus similaire à celle du Pacifique qu'à celle de l'Atlantique, sans doute parce qu'ils sont soumis aux mêmes types de pression ; risque similaire de prédation dans ces océans, écotourisme se développant à Maurice... Il est urgent de mettre en place une gestion et une conservation adéquates pour ces cachalots.

Plusieurs hypothèses ont été testées pour rendre ce travail plus pertinent mais il faut garder en tête que les études descriptives mettant en avant les caractéristiques d'un groupe social spécifique sont nécessaires afin de pouvoir par la suite fournir un cadre d'étude comparative à d'autres groupes sociaux. Les études descriptives mettant en avant des paramètres sur une population sont un outil indispensable pour la conservation d'une espèce. Elles peuvent fournir des pistes essentielles du point de vue de la conservation dans la zone de gestion de leur région d'habitat (Mann et Würsig, 2014 ; Whitehead, 2008). Pour adapter la gestion de la conservation et les approches évolutives, Mann et Würsig (2014) considèrent en effet qu'il est essentiel d'avoir une cartographie du comportement des cétacés. Et cela même si le comportement en surface ne correspond qu'à 25% des comportements des cachalots.

## 5. Bibliographie

Amorim, T. O. S. *et al.* (2020). Coda repertoire and vocal clans of sperm whales in the western Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 160(February). doi: 10.1016/j.dsr.2020.103254.

Antunes, R. *et al.* (2011). Individually distinctive acoustic features in sperm whale codas. *Animal Behaviour*, 81(4), pp. 723–730. doi: 10.1016/j.anbehav.2010.12.019.

Barteneva, L. (2020). *MAUBYDICK Project: Population estimates of Sperm whales (Physeter macrocephalus) of Mauritius, monitoring of its dynamics and their movements*. Scientific Report for the period 2013-2020, Mauritius.

BBC (2021). *Stack of cups and packing straps found inside whale*. [Online] Disponible à : <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-56374384#:~:text=Scientists%20have%20revealed%20a%20list,beach%20in%20late%20November%202019>

Beauguitte, L. (2010). *Ucinet et Netdraw, Logiciels pour l'analyse des réseaux sociaux*. Université Paris 7, pp. 1–38.

Bradbury, J. W. and Vehrencamp, S. (2000). Economic models of animal communication. *Animal Behaviour*, 59, pp. 259-268. doi: 10.1006/anbe.1999.1330

Cantor, W. (2015). How does social behavior differ among sperm whale clans? *Marine mammal science*, 31 (4), pp. 1275–1290. doi:10.1111/ mms.12218.

Christal, J. and Whitehead, H. (2001). Social affiliations within sperm whale (*Physeter macrocephalus*) groups. *Ethology*, 107(4), pp. 323–340. doi: 10.1046/j.1439-0310.2001.00666.x.

Coakes, A. K. and Whitehead, H. (2004). Social structure and mating system of sperm whales off northern Chile. *Canadian Journal of Zoology*, 82(8), pp. 1360–1369. doi: 10.1139/Z04-115.

Gero, S. *et al.* (2014a). Behavior and social structure of the sperm whales of Dominica, West Indies. *Marine Mammal Science*, 30(3), pp. 905–922. doi: 10.1111/mms.12086.

Gero, G., Gordon, J. and Whitehead, H. (2014b). Individualized social preferences and long-term social fidelity between social units of sperm whales. *Animal behaviour*, 102 (2015), pp. 15–23.

Gero, S. and Whitehead, H. (2016). Critical decline of the eastern Caribbean sperm whale population. *PLoS ONE*, 11(10), pp. 1–11. doi: 10.1371/journal.pone.0162019.

Girardet, J., *et al.* (2021). Long distance runners in the marine realm: New insights into genetic diversity, kin relationships and social fidelity of Indian Ocean male sperm whales. *BioRxiv*, (1), pp. 1–23. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.04.23.440733>

Goddard, N. (2015). *Données récentes sur le comportement du grand cachalot (Physeter macrocephalus)*. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier de Toulouse.

Hinde, R. A. (1976). Interactions, relationships, and social structure. *Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 11(1), pp. 1-17.

Huijser, L. A. E. *et al.* (2019). Vocal repertoires and insights into social structure of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in Mauritius, southwestern Indian Ocean. *Marine Mammal Science*, 36(2), pp. 638–657. doi: 10.1111/mms.12673.

Konrad, C. M. *et al.* (2018). Kinship influences sperm whale social organization within, but generally not among, social units. *Royal Society Open Science*, 5(8). doi: 10.1098/rsos.180914.

Madsen, P. (2002a). Sperm whale sound production studied with ultrasound time/depth-recording tags. *Journal of experimental biology*. 205 (13), 1899–1906.

Madsen, P.T., Wahlberg, M. & Møhl, B.. (2002b). Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high-latitude habitat: Implications for echolocation and communication. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 53. 31-41. 10.1007/s00265-002-0548-1.

Mathevon, N. *et al.* (2008). Singing in the rain forest: How a tropical song transfers information. *Plos One*, 3(2), e1580. doi: 10.1371/journal.pone.0001580.

Mann, J. and Würsig, B. (2014). Chapter 17, Observing and quantifying cetacean behavior in the wild: Current problems, limitations, and future directions. *Primates and Cetaceans. Field Research and Conservation of Complex Mammalian Societies*. pp 335 – 344.

Melendez, K. V. and Feng, A. S. (2010). Communication calls of little brown bats display individual-specific characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2), pp. 919–923. doi: 10.1121/1.3455835.

Mesnick, S. L., Evans, K., Taylor, B. L., Hyde, J., Escorza-Trevino, S. and Dizon A. E. (2003). *Sperm Whale Social Structure: Why it takes a village to raise a child. Animal social complexity*. Cambridge and London: Harvard University Press.

Møhl, B. *et al.* (2003). The monopulsed nature of sperm whale clicks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2), pp. 1143–1154. doi: 10.1121/1.1586258.

Nguyen Hong Duc, P., Torterotot, M., Samaran, F., White, P. R., Gérard, O., Adam, O., and Cazau, D. (2021). Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics. *Ecological Informatics*, Elsevier 61, 12pp. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101185>.

Oliveira, C. *et al.* (2016). Sperm whale codas may encode individuality as well as clan identity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5), pp. 2860–2869. doi: 10.1121/1.4949478.

Parker, L. (2018). *Sperm whale found dead with 13 pounds of plastic in its stomach*. National Geographic. [Online] Disponible à : <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/dead-sperm-whale-filled-with-plastic-trash-indonesia>

Rendell, L. and Whitehead, H. (2003). Vocal clans in sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *The Royal Society B, Biological Sciences*, 270(1512). <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2239>

Sarano, F. (2017). *Le retour de Moby Dick, ou ce que les cachalots nous enseignent sur les océans et les hommes*, Mondes sauvages, Actes Sud, France.

Sarano, F. (2019). *Cachalots de l’Ile Maurice*. Étude et préservation des cachalots. Association Longitude 181.

Sarano, F. (2020). *Cartes d’identité des cachalots de l’Ile Maurice*. Association Longitude 181, Ile Maurice.

Sarano, F. *et al.* (2021a). Kin relationships in cultural species of the marine realm: Case study of a matrilineal social group of sperm whales off Mauritius island, Indian Ocean. *Royal Society Open Science*, 8(201794). doi: 10.1098/rsos.201794.

Sarano, V. *et al.* (2021b). Underwater photo-identification of marine megafauna: an identity card catalogue of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) off Mauritius Island. *BioRxiv* (8), pp. 1–25. doi: <https://doi.org/10.1101/2021.03.08.433909>.

Sauvêtre, M. (2018). *Etude étho-acoustique des cachalots de l’Ile Maurice*. Rapport de stage semestre 4, Université Paul Sabatier.

Schulz, W. (2009). Off-axis effects on the multi-pulse structure of sperm whale coda clicks. *The Journal of the Acoustical Society of America*. [Online] 125 (3), 1768–1773.

Taylor, B. L., Baird, R., Barlow, J., Dawson, S.M., Ford, J., Mead, J.G. *et al.* (2019). *Physeter macrocephalus* (amended version of 2008 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2019 : <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T41755A160983555.en>.

Wahlberg, M., Møhl, B. and Teglberg Madsen, P. (2001). Estimating source position accuracy of a large-aperture hydrophone array for bioacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(1), pp. 397–406. doi: 10.1121/1.1329619.

Weilgart, L. and Whitehead, H., 1993. Coda communication by sperm whales (*Physeter macrocephalus*) off the Galápagos Islands. *Can. J. Zool.* 71, pp. 744–752. <https://doi.org/10.1139/z93-098>

Whitehead, H. (2003). *Sperm whales: Social Evolution in the Ocean*. Chicago and London: The University of Chicago Press.

Whitehead, H. (2008). *Analyzing animal societies: quantitative methods for vertebrate social analysis*. Chicago and London: The University of Chicago Press.

Whitehead, H. *et al.* (2011). Multilevel Societies of Female Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*) in the Atlantic and Pacific: Why Are They So Different? *International Journal of Primatology*, 33(5), pp. 1142–1164. doi: 10.1007/s10764-012-9598-z.

Würsig, B., Perrin, W. F. and Thewissen, J. G. M. (2009). *Encyclopedia of Marine Mammals*. Academic Press. Second Edition.

Yernaux, A. (2018). *Etude étho-acoustique des cachalots au large de l'île Maurice*. Master Sciences de la Mer. Thèse de master, Sorbonne Université.

Zimmer, W. M. X. *et al.* (2005). Off-axis effects on the multipulse structure of sperm whale usual clicks with implications for sound production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(5), pp. 3337–3345. doi: 10.1121/1.2082707.

## 6. Annexes

### Annexe 1. Glossaire

#### Définition des termes en lien avec la structure sociale des cachalots tirés de la littérature :

**Agrégation** : « Animaux se trouvant dans une zone particulière, de quelques kilomètres de côté, à un moment donné » (Whitehead, 2003).

**Association** : « Une façon de désigner si deux individus sont "ensemble", dans le but de calculer les indices d'association » (Konrad *et al.*, 2018).

**Clan** : « Niveau supérieur de la structure sociale du cachalot composé d'unités sociales qui partagent des comportements socialement appris, y compris des répertoires vocaux distincts » (Cantor *et al.*, 2015 ; Konrad *et al.*, 2018). « Animaux qui utilisent un répertoire similaire de coda » (Whitehead, 2003)

**Clics réguliers** (ou « usual clicks ») : plusieurs minutes avec un ICI se situant à plus de 0,5s. Émission d'une succession de clics dont l'ICI est constant sur toute l'émission.

**Cluster** : « Regroupement de cachalots individuels à la surface, à proximité les uns des autres (moins de 40 m) avec un comportement coordonné » (Konrad *et al.*, 2018). « Groupe de cachalots individuels à la surface, très proches les uns des autres (moins de 40 m) et ayant un comportement coordonné » (Whitehead, 2003).

**Coda** : émission d'une série de clics dont l'ICI est fortement réduit suivi d'une autre série de clics ayant un ICI plus espacé et plus ou moins régulier, de 3 à 20 clics pour une durée de 0,2 à 5 s.

**Groupe** : « Ensemble de cachalots voyageant temporairement ensemble, pendant des heures ou des jours, pouvant inclure plus d'une unité sociale. Les membres du groupe peuvent se regrouper en grappes serrées pour socialiser ou se disperser sur des kilomètres pour chercher de la nourriture » (Whitehead, 1992 ; Konrad *et al.*, 2018). « Animaux se déplaçant de manière coordonnée, pendant plusieurs heures ou plus » (Whitehead, 2003).

**Groupement** : « Animaux nageant côte à côte, de manière coordonnée, à quelques longueurs de corps de distance » (Whitehead, 2003).

**Interaction** : « Action d'un animal dirigée vers un autre ou affectant le comportement d'un autre » (Whitehead, 2008).

**Unité sociale (unité)** : « Les unités constituent le niveau de base de la structure sociale des cachalots. Les membres de l'unité partagent une relation sociale stable et à long terme au fil des années » (Gero *et al.*, 2014). « Cachalots ayant des relations sociales stables et à long terme, définis comme des individus identifiés à moins de 2 heures les uns des autres au cours d'au moins deux années différentes » (Gero *et al.*, 2014 ; Konrad *et al.*, 2018). « Animaux qui restent ensemble et se déplacent ensemble, pendant des années ou plus » (Whitehead, 2003). « Ensemble d'animaux en association permanente ou quasi permanente » (Whitehead, 2008).

**Société** : « Groupe d'individus appartenant à la même espèce et organisé de manière coopérative » (Whitehead, 2008).

**Sociogramme** : « Représentation diagrammatique de la structure sociale dans laquelle les individus sont représentés par des nœuds. Les arêtes entre les nœuds indiquent la force de la relation dyadique » (Whitehead, 2008).

**Structure de surface** : « Nature, qualité et agencement des relations » (Whitehead, 2008).

**Structure** : « Généralisation de la structure de surface à travers les populations » (Whitehead, 2008).

**Structure profonde** : « Compréhension dynamique des modèles de relations » (Whitehead, 2008).

**Organisation sociale** : « Schéma des interactions entre les individus, description du comportement ; taille, composition sexuelle et cohésion spatio-temporelle de la société ; union de niches sociales qui se chevauchent » (Whitehead, 2008).

**Structure sociale :** « Composition des groupes et distribution spatiale des individus ; modèle d'interactions sociales et relations qui en résultent entre les membres d'une société ; synthèse de la nature, de la qualité et du schéma des relations entre les membres d'une population » (Whitehead, 2008).

**Système social :** « Ensemble d'animaux conspécifiques qui interagissent régulièrement et davantage les uns avec les autres qu'avec les membres d'autres sociétés de ce type ; considéré comme synonyme de "société" » (Whitehead, 2008).

Définition des termes en lien avec la structure sociale des cachalots :

**Adulte :** âge du cachalot supérieur à 9 ans.

**Dyade :** 2 individus séparés/regroupés par une distance plus courte que la taille d'un individu adulte.

**Groupe d'interaction :** dyade ou triade.

**Immature :** âge du cachalot entre 4 et 9 ans.

**Jeune :** âge du cachalot entre 0 et 3 ans.

**Juvenile :** âge du cachalot entre 0 et 9 ans.

**Occurrence :** l'occurrence d'un événement est son apparition dans le temps, ce qui permet de parler de sa fréquence.

**Triade :** 3 individus séparés par une distance plus courte que la taille d'un individu adulte.

## Annexe 2. Récapitulatif des statistiques

### 1. Statistiques descriptives

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Rotation	1,300	4,860	2,918	0,956
Contact	1,970	8,550	5,410	2,392
Tête - Fente génitale	0,000	4,550	1,494	1,596
Nage accompagnée	0,000	2,430	0,968	0,937
Latéral – Latéral	0,000	4,530	1,520	1,357
Tête – Corps	2,560	11,110	5,803	2,526
Tête – Tête	0,000	4,850	2,378	1,417
Tête - Fente génitale	0,320	12,670	5,119	3,573
Mordre	0,000	1,940	0,500	0,804
Dos – Dos	0,000	0,410	0,144	0,181
Ventre – Ventre	0,000	1,450	0,557	0,587
Ventre – Latéral	0,000	1,650	0,520	0,596
Dos – Ventre	0,000	3,240	1,185	0,968
Latéral – Dos	0,000	1,210	0,308	0,403
Mandibule – Mandibule	0,000	0,970	0,155	0,315
Queue – Corps	2,530	13,330	5,651	2,987
Queue – Queue	0,000	6,760	1,702	1,887

### 2. Test de normalité

Comportements (fréquence d'occurrence)	Test de Shapiro-Wilk (p-value)
Rotation	0,773
Contact	0,076
Tête – fente génitale	0,136
Nage accompagnée	0,185
Interaction	1,07440350571864 <sup>E-06</sup>
Mordre	<b>0,00028</b>
Dos – Dos	<b>0,001</b>
Dos – Ventre	0,509
Ventre – Ventre	<b>0,013</b>
Ventre – Latéral	<b>0,020</b>
Latéral – Latéral	0,232
Latéral – Dos	<b>0,009</b>
Tête – Corps	0,121
Tête – Tête	0,302

Mandibule – Mandibule	<0,0001
Queue – Corps	0,029
Queue – Queue	0,006
Tête – Fente génitale	0,311

### 3. Test t de Student

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	p-value	DDL
Tête – fente Classes-immature	5	0,000	0,860	0,318	0,339	0,002	7
Tête – fente Classes-jeune	4	1,890	4,550	2,965	1,206		
Nage accompagnée Classes-immature	5	0,000	0,780	0,240	0,321	0,0004	7
Nage accompagnée Classes-jeune	4	1,300	2,430	1,878	0,469		

Variable	Modalités : jeune – immature (p-value)	Modalités : femelle – mâle (p-value)
Latéral – Latéral	0,051	0,433
Tête – Corps	0,982	0,106
Tête – Tête	0,425	0,559
Tête – Fente génitale	0,079	0,358
Dos – Ventre	0,754	0,259

### 4. ANOVA

Variable : Classes avec comme modalités : Femelle adulte, immature, jeune

	DDL	Pr > F	R2
Rotation	2	0,057	0,356
Contact	2	0,002	0,611

### 5. Mann-Whitney

Variable/Sous-échantillons	Modalités : jeune – immature (p-value)	Modalités : femelle – mâle (p-value)
Mordre	0,495	0,283
Dos – Dos	0,053	0,141
Ventre – Ventre	0,621	0,667
Ventre – Latéral	0,419	0,808
Latéral – Dos	0,205	0,303
Mandibule – Mandibule	0,727	0,509
Queue – Corps	1,000	0,933
Queue – Queue	1,000	0,808