



Université de Toulon – Master Sciences de la mer – Parcours Interactions biotiques et Perturbations Anthropiques (IPA)

Mémoire de stage de Master première année  
Année universitaire 2023-2024

## **Etude comparée du répertoire de codas de deux groupes de cachalots récemment séparés (Île Maurice)**

Par : Viethen Salomé



**Réalisé sous la direction de Giraudet Pascale**  
Enseignante – Chercheuse associée au LIS

Responsable : Jamet Dominique

Université de Toulon, Laboratoire LIS – UMR CNRS 7020  
(Avenue de l'Université, campus de La Garde, bâtiment X, 83130 LA GARDE)

Dans le cadre du programme “La Voix des Cachalots” conduit par Longitude 181, en collaboration avec l'Indian Ocean Marine Life Foundation

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>5</b>
<b>I. Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>II. Matériels et Méthodes</b> .....	<b>8</b>
<i>II.1. Zone d'étude et acquisition des données</i> .....	8
<i>II.2. Présentation du groupe social</i> .....	8
<i>II.3. Création de la base de données</i> .....	9
<b>III. Résultats</b> .....	<b>13</b>
<i>III.1. Nombre de clics par coda</i> .....	13
<i>III.2. Structures des codas</i> .....	13
<i>III.3. Structures temporelles et intervalles inter-clics normalisés</i> .....	15
III.3.1. Variabilité intra-type .....	15
III.3.2. La durée totale des codas .....	16
III.3.3. Les ICI normalisés .....	16
<b>IV. Discussion</b> .....	<b>18</b>
<b>V. Perspectives</b> .....	<b>20</b>
<i>V.1. Caractérisation de la variabilité individuelle</i> .....	21
<i>V.2. Caractérisation d'un dialogue entre les deux femelles</i> .....	23
<i>V.3. Comportements et communication</i> .....	25
<i>V.4. Discussion</i> .....	26
<b>VI. Conclusion</b> .....	<b>28</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>29</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>32</b>
I. Tests statistiques sur les deux unités sociales.....	32
II. Fiches d'identification des femelles adultes Delphine et Caroline de 2023.....	33
III. Contribution à la réalisation d'un poster .....	35
<b>Abstract</b> .....	<b>36</b>

# Table des illustrations

Figure 1 : Vue aérienne de l'Île Maurice et sa localité (Source : Google Earth).....	8
Figure 2 : Antenne acoustique OPALE (2023) – Lara Berkenbaum (© René Heuzey).....	8
Figure 3 : Arbre généalogique du clan d'Irène Gueule Tordue (F. Sarano, Longitude 181, communication personnelle 2024)....	9
Figure 4 : Visualisation avec Python, d'un signal acoustique de cachalot en fonction du temps, enregistré à l'aide de l'antenne OPALE. ....	10
Figure 5 : Affichage du spectrogramme sur Audacity d'une coda à 8 clics (fig. 4, b.).....	10
Figure 6 : Détection semi-automatique des clics des codas sur Python (étoiles rouges).....	11
Figure 7 : Illustration schématique de la classification des codas utilisée (exemple d'une coda à 5 clics). Chaque « / » représente un clic.....	11
Figure 8 : Histogramme du nombre de codas en fonction du nombre de clics pour chacune des unités sociales .....	13
Figure 9 : Histogramme reprenant les occurrences des vingt et une structures de codas représentées au moins 2 fois dans la base de données. Les structures sont réparties par ordre croissant en fonction du nombre de clics .....	14
Figure 10 : Représentation des codas à 8 clics du type 2+1+1+1+1+1 en fonction des valeurs de leur ICI pour a) l'unité sociale d'Irène et b) l'unité sociale de Vanessa. Les points représentent les clics et les barres les ICI entre chaque clic. ....	15
Figure 11 : Représentation des codas à 9 clics du type 3+1+1+1+1+1 en fonction des valeurs de leur ICI pour a) l'unité sociale d'Irène et b) l'unité sociale de Vanessa. Les points représentent les clics et les barres les ICI entre chaque clic .....	15
Figure 12 : Densité de probabilité des structures de codas en fonction de la durée totale de la coda. a) Structure de coda 2+1+1+1+1+1 ; b) Structure de coda 3+1+1+1+1+1 .....	16
Figure 13 : Diagramme en violon comparant la distribution des ICI normalisés pour la structure de coda 2+1+1+1+1+1 (8 clics) et 3+1+1+1+1+1 (9 clics) entre les deux unités (1 : Unité d'Irène, 2 : Unité de Vanessa) .....	17
Figure 14 : Arbre de distance et intensité en fonction du temps pour deux codas chevauchées de l'enregistrement audio 20230501_080834 (14.a et 14.b). IPI correspondants à chaque codas (14.c) .....	21
Figure 15 : Histogramme du nombre de codas en fonction du nombre de clics pour chaque individu étudiées .....	22
Figure 16 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par les deux femelles adultes étudiées. Les structures sont réparties par ordre croissant en fonction du nombre de clics .....	22
Figure 17 : Représentation des codas de structure 2+1+1+1+1+1 et 3+1+1+1+1+1 des deux femelles adultes étudiées. a) 2+1+1+1+1+1 : bleu foncé, 3+1+1+1+1+1 : bleu clair et b) 2+1+1+1+1+1 : gris foncé, 3+1+1+1+1+1 : gris clair..	23
Figure 18 : Conversation de 18 codas entre Delphine et Caroline. L'ordre des codas a été déterminée à l'aide de la détermination des IPI (encadré rouge : Delphine, encadré vert : Caroline).....	24
Figure 19 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par Delphine et Caroline lorsque Delphine se situe au-dessus. En tout, 37 codas ont été enregistrées lors de ce comportement (27 de Caroline et 10 de Delphine). ....	25
Figure 20 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par Delphine et Caroline lorsque Caroline se situe au-dessus. En tout, 5 codas ont été enregistrées lors de ce comportement (3 de Caroline et 2 de Delphine). ....	26
Tableau 1: Statistiques des enregistrements audios analysés.....	9

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma maitre de stage, Madame Giraudet Pascale, pour son encadrement, sa bienveillance, sa patience et ses conseils précieux tout au long de mon stage. Je remercie également Glotin Hervé, sans qui mon stage n'aurait jamais pu avoir lieu. Merci de m'avoir offert la possibilité d'étudier ces animaux si fascinants et pour qui j'éprouve une grande admiration.

Mes remerciements à toute l'équipe du CIAN (Centre international d'Intelligence Artificielle en Acoustique Naturelle) et du DYNI du LIS (Laboratoire d'Informatique et des Systèmes) de l'Université de Toulon, pour leur accueil chaleureux et leur aide techniques, et tout particulièrement à Berkenbaum Lara, dont le travail a été d'une grande aide. Ce rapport n'aurait pas été ce qu'il est sans le temps, le travail, et les conseils de Lara. Un grand merci pour ton aide, ton expertise et tes précieux conseils. Je tiens également à remercier Glotin Clara pour son travail précieux, qui a grandement contribué à l'avancement de nos recherches. Sans son apport, certaines zones d'ombre seraient restées plus importantes qu'elles ne le sont aujourd'hui.

Je souhaiterais aussi remercier François Sarano et son épouse Véronique, de Longitude 181, sans qui tout ce travail n'aurait pas été possible, merci pour votre aide précieuse et votre expertise sur ces animaux. Merci de nous avoir fourni les superbes enregistrements, et merci également à René Heuzey, Axel Preud'homme et Navin Boodhoney pour ces enregistrements.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille. Merci pour votre soutien si précieux, votre patience et votre amour inconditionnel. Un merci particulier à mes parents, qui ont toujours cultivé ma curiosité dans des domaines variés. Sans eux, mon admiration pour ces géants des mers n'aurait peut-être jamais vu le jour.

## Résumé

La communication sociale chez les cachalots (*Physeter macrocephalus*), repose sur l'émission de courtes séquences répétées et stéréotypées de clics appelées codas (Adam O., et al., 2020 ; Marcoux M., et al., 2006 ; Rendell L., et al. 2004). Ces codas sont principalement émises lors des interactions sociales, par les femelles adultes et sont transmises par apprentissage aux plus jeunes (Adam O., et al., 2020 ; Marcoux M., et al., 2006 ; Frantzis A., et al., 2008).

Le clan d'Irène Gueule Tordue, vivant au large de l'Île Maurice, montre une séparation progressive depuis 2017, remarquée par les observateurs, suscitant l'hypothèse d'une différenciation de leur communication vocale. Pour explorer cette question, les répertoires de codas des deux unités sociales issues du groupe social de 25 individus, ont été étudiées pour l'année 2023, révélant des différences significatives dans les structures de codas utilisées. De plus, une première exploration de la variabilité individuelle et comportementale a été réalisée sur une dyade de deux femelles adultes connues de l'unité sociale de Vanessa.

L'analyse bioacoustique des enregistrements audios a permis d'identifier et d'analyser 397 codas, permettant de mettre en évidence une différence dans les structures de codas émises entre des deux unités sociales. Les deux unités sociales partagent de nombreuses structures de coda et la structure 2+1+1+1+1+1 caractéristique est retrouvée (Berkenbaum L., 2021 ; Coch J., et al., 2023). Cependant, il s'est avéré que cette structure était bien plus fréquemment émise par l'unité de Vanessa (n=85). De plus, l'unité d'Irène émet également des codas de structure 3+1+1+1+1+1 très fréquemment (n=35).

L'analyse des durées totale des codas et des ICI normalisés n'a révélée aucune différence entre les deux unités sociales.

L'estimation des locuteurs des codas grâce au calcul des IPI (Ferrari et al., 2023) a permis l'étude des variabilités intra-individus et inter-individus, de deux femelles adultes en interaction dyadique régulière. Les résultats ont montré que les répertoires individuels de codas semblent plus restreints que les répertoires des unités sociales. De plus, les individus semblent émettre préférentiellement certaines structures de codas selon le contexte social et certains contextes sociaux ou contacts semblent stimuler la production de codas. Ainsi, ces résultats confirment un rôle fonctionnel des vocalises dans la communication interindividuelle et suggèrent l'existence d'une stratégie de communication vocalisée adaptative en lien avec le contexte social et comportemental, qui pourrait expliquer les différences observées.

D'autre part, en raison de la taille limitée de la base de données, des conclusions définitives sur la séparation des deux unités sociales ou sur la variabilité individuelle et comportementale, restent difficiles à tirer. Des études supplémentaires, intégrant d'autres variables tels que les liens familiaux sont nécessaires pour essayer de démontrer une différenciation vocale au sein des deux unités sociales. Ces études pourraient nous permettre de mieux comprendre les processus de communication chez ce clan de cachalots et d'approfondir la notion de variabilité en lien avec le contexte social et les individus.

## I. Introduction

La communication animale peut se manifester de diverses façons selon les canaux sensoriels employés (Brun C., et al, 2023). Les signaux spécifiques utilisés par chaque espèce varient en fonction de leur environnement et de la complexité de leur structure sociale (Brun C., et al, 2023). Parmi les différents types de signaux, les signaux acoustiques sont largement utilisés dans le règne animal, car ils ont l'avantage de pouvoir être perçus sur de longue distance, et indépendamment de la visibilité du destinataire (Brun C., et al, 2023).

La communication sonore est particulièrement importante sous la surface de l'eau où la visibilité est réduite (Giraudet P., 2024). En outre, une structure sociale élaborée peut être un facteur évolutif des systèmes de communication (Gero S., et al., 2016). Les cétacés, par exemple, possèdent des systèmes de communication sophistiqués et des structures sociales complexes (Gero S., et al., 2016). Ainsi, de nombreux mammifères marins utilisent des signaux acoustiques pour communiquer (Richardson W.J., et al., 1995). De plus, l'apprentissage social semble favoriser la transmission culturelle de modèles de comportement chez ces espèces (Gero S., et al., 2016).

Le Grand Cachalot (*Physeter macrocephalus*, Linnaeus 1758) est la plus grande espèce d'Odontocète, de la famille des Physétérédés et unique représentant de son genre *Physeter* (Goddard N., 2015). Cette espèce présente un dimorphisme sexuel marqué avec des femelles mesurant 11 à 12 mètres et les mâles, 13 à 16 mètres (Christal et Whitehead, 2001 ; Abeille R., 2014). C'est un animal pélagique, qui est retrouvé dans les eaux profondes de tous les océans du globe, avec une répartition qui s'étend des régions tropicales jusqu'à des latitudes d'au moins 70° (Rendell L. et Frantzis A., 2016).

L'étude des productions sonores de cachalot permet d'obtenir des informations sur leur morphologie (taille, sexe), sur leurs déplacements et également sur leurs comportements (communication, interactions sociales, chasse) (Patris J., 2021).

Les cachalots vivent dans des sociétés organisées de plusieurs niveaux (Gero S., et al. 2016). Le niveau fondamental de leur structure sociale est l'unité sociale quasi permanente, composée d'environ dix femelles et juvéniles (Amorim T.O.S., et al., 2020 ; Whitehead H., et al., 2012). Ces unités peuvent se regrouper temporairement en groupes allant jusqu'à 50 individus, formant ainsi un clan vocal. Ce dernier représente le niveau le plus élevé de leur structure sociale, caractérisé, à l'échelle des bassins océaniques, par des répertoires communs de codas transmis culturellement (Amorim T.O.S., et al., 2020 ; Gero S., et al. 2016 ; Whitehead H., et al., 2012).

Les codas sont définies comme des courtes séquences répétées et stéréotypées de clics, d'une durée souvent inférieure à 3 secondes (Rendell L., et al. 2004 ; Sharma P., et al., 2024 ; Watkins W.A., et al., 1997). La production de codas au sein des groupes de cachalots semble être fortement liée au comportement social (Adam O., et al., 2020 ; Marcoux M., et al., 2006). Elles sont principalement échangées par les femelles adultes et les juvéniles pendant les interactions sociales en surface (Adam O., et al., 2020 ; Sharma P., et al., 2024).

Jusqu'à présent, le système de communication des cachalots est défini par un répertoire de types de codas, chacun déterminé par une séquence caractéristique d'intervalles inter-clics (ICI) (Sharma P., et al., 2024). Les ICI permettent l'annotation des codas, définis par le regroupement en paquets des clics rapprochés (ayant un ICI faible) (par exemple : 3+1+1) (Coch J., et al., 2023). Les structures et les répertoires peuvent être déterminés manuellement ou à l'aide de méthodes de regroupement automatisées (Sharma P., et al., 2024). Ces techniques ont permis de délimiter les frontières culturelles des clans de cachalots, socialement séparés mais vivant dans les mêmes régions, car les individus d'une même unité sociale partagent des codas ayant la même structure temporelle (Adam O., et al., 2020 ; Sharma P., et al., 2024).

Des recherches antérieures ont identifié environ 150 structures de codas distinctes dans le monde entier, les plus fréquentes étant du type 2+2 (4 clics) ou 2+4 (6 clics) aux Galapagos, 1+1+3 (5 clics) dans les Caraïbes, 3+1 (4 clics) dans le sanctuaire Pelagos (Méditerranée nord-occidentale) et 2+1+1+1+1+1 (8 clics) à

l'Île Maurice (Berkenbaum L., 2021 ; Coch J., et al., 2023 ; Huijser Léonie A. E., 2020 ; Sharma P., et al., 2024).

Depuis plus de 10 ans, F. Sarano , V. Sarano (Longitude 181) et l'équipe de l'Indian Ocean Marine Life Fondation (René Heuzey et Axel Preud'homme), observent et étudient un même groupe de cachalots à l'Île Maurice. Ils ont notamment réalisé des cartes d'identité, des études génétiques et des courbes de croissances des individus composant ce groupe (Communication personnelle) (Girardet J., et al., 2022 ; Sarano F., et al., 2021 ; Sarano V., et al., 2022). Depuis 2017, ils observent une lente séparation du groupe sociale en deux unités sociales distinctes, et depuis 2023, la séparation peut être considérée comme totale.

Les individus d'un même groupe social possèdent le même répertoire de codas, lequel est transmis de génération en génération par transmission culturelle (Coch J., et al., 2023 ; Frantzis A., et al., 2008). L'objectif de cette étude était d'analyser les répertoires de codas des deux unités sociales résultant de la séparation d'un des groupes sociaux de l'Île Maurice, afin d'identifier une potentielle différence de communication entre elles. Une analyse des signaux acoustiques a été réalisée en utilisant des programmes Python et le logiciel Audacity pour créer une base de données de codas. Les intervalles inter-clics (ICI) ont ensuite été déterminés à partir de cette base, permettant la classification des structures de codas émises par les deux unités sociales. Des variabilités internes aux structures des codas, comme la durée totale des codas ou les ICI normalisés, ont également été analysées, en plus des structures.

Enfin, des tests statistiques ont été effectués sur le logiciel RStudio pour répondre à notre problématique.

## II. Matériels et Méthodes

### II.1. Zone d'étude et acquisition des données

Cette étude a été réalisée sur une base de données d'enregistrements audios et vidéos recueillis au large des côtes Nord et Ouest de l'Île Maurice, dans l'océan Indien (fig. 1). Ces enregistrements nous ont été fournis par Longitude 181 dans le cadre du programme de recherche « La Voix des Cachalots » en partenariat avec l'Indian Ocean Marine Life Foundation, ONG mauricienne fondée par René Heuzey et avec l'association Un Océan de Vie (Sarano F., 2023, communication personnelle).



*Figure 1 : Vue aérienne de l'Île Maurice et sa localité (Source : Google Earth)*



*Figure 2 : Antenne acoustique  
OPALE (2023) – Lara  
Berkenbaum (©René Heuzey)*

Avec l'autorisation officielle des autorités publiques mauriciennes, les enregistrements audio-vidéo sont recueillis par acoustique passive par une équipe d'observateurs scientifiques composée principalement de nageurs en snorkeling avec des caméras de type GoPro. Les sorties en mer ont lieu entre le lever du soleil et midi, conformément aux autorisations du gouvernement mauricien, interdisant les observations de cétacés l'après-midi. Les cachalots sont également enregistrés à l'aide de l'antenne acoustique OPALE (fig. 2), spécialement conçu par l'équipe du Pr Hervé Glotin (LIS/CIAN de l'Université de Toulon, DYNI, CNRS et SMIOT (Glotin H., 2024)), tenue par un plongeur en snorkeling à la surface, à une distance de 10m minimum des individus. En 2023, cette antenne était équipée de deux caméras GoPro et cinq hydrophones, pour localiser précisément chaque source sonore et observer les comportements sociaux de surface et subsurface. Dans cette étude, seule les pistes audios extraites des vidéos ont été analysées.

### II.2. Présentation du groupe social

Depuis 2013, un groupe matriarcal spécifique d'une trentaine d'individus (selon les naissances et disparitions) est annuellement observé et étudié par l'équipe d'observateurs (Sarano F., 2017 ; Sarano F., 2023) et a été baptisé le « Clan d'Irène Gueule Tordue » (IGT).

Depuis 2015, Longitude 181 dresse un catalogue de photo-identification, mis à jour et complété avec les fiches des nouveau-nés de l'année et avec celles des nouveaux individus rencontrés chaque année. Il se base sur des observations sous-marines et compte actuellement une centaine de « carte d'identité » de cachalots (Sarano V., 2022 ; Longitude 181, 2015 (Communication personnelle)).

A l'aide des cartes d'identité, l'équipe suit l'évolution du groupe sociale d'IGT depuis plus d'une dizaine d'année. Depuis 2017, en faisant le bilan des observations année après année, les observateurs ont mis en évidence une séparation progressive du groupe d'IGT en deux unités sociales distinctes qui se réunissaient de moins en moins souvent. Ces constatations sont appuyées par une étude génétique du clan, qui a permis

de mettre en évidence les deux unités sociales au sein du clan d'IGT, ainsi que la réalisation d'un arbre généalogique (Communication personnelle) (Girardet J., et al., 2022 ; Sarano F. et al., 2021) (fig. 3).

Au cours de l'année 2023, sur 100 jours d'observations de février à juin, le groupe social a été observé réunit qu'à 3 reprises seulement. Les deux unités sociales comptaient au total 25 individus, la première, l'unité d'Irène se composait de 15 individus, dont 9 femelles adultes (Aïko, Dos Calleux, Germine, Irène Gueule Tordue, Issa, Lucy, Mina, Mystère et Yukimi) et 6 juvéniles (Ali, Daren, Miss Tautou, Myriam, Yulia et Varuna). La deuxième unité sociale, celle de Vanessa, était constituée de 10 individus, dont 5 femelles adultes (Adélie, Caroline, Delphine, Emy, Vanessa) et 5 juvéniles (Andréas, Chesna, Eliot, Zoé, Mégane) (fig. 3).

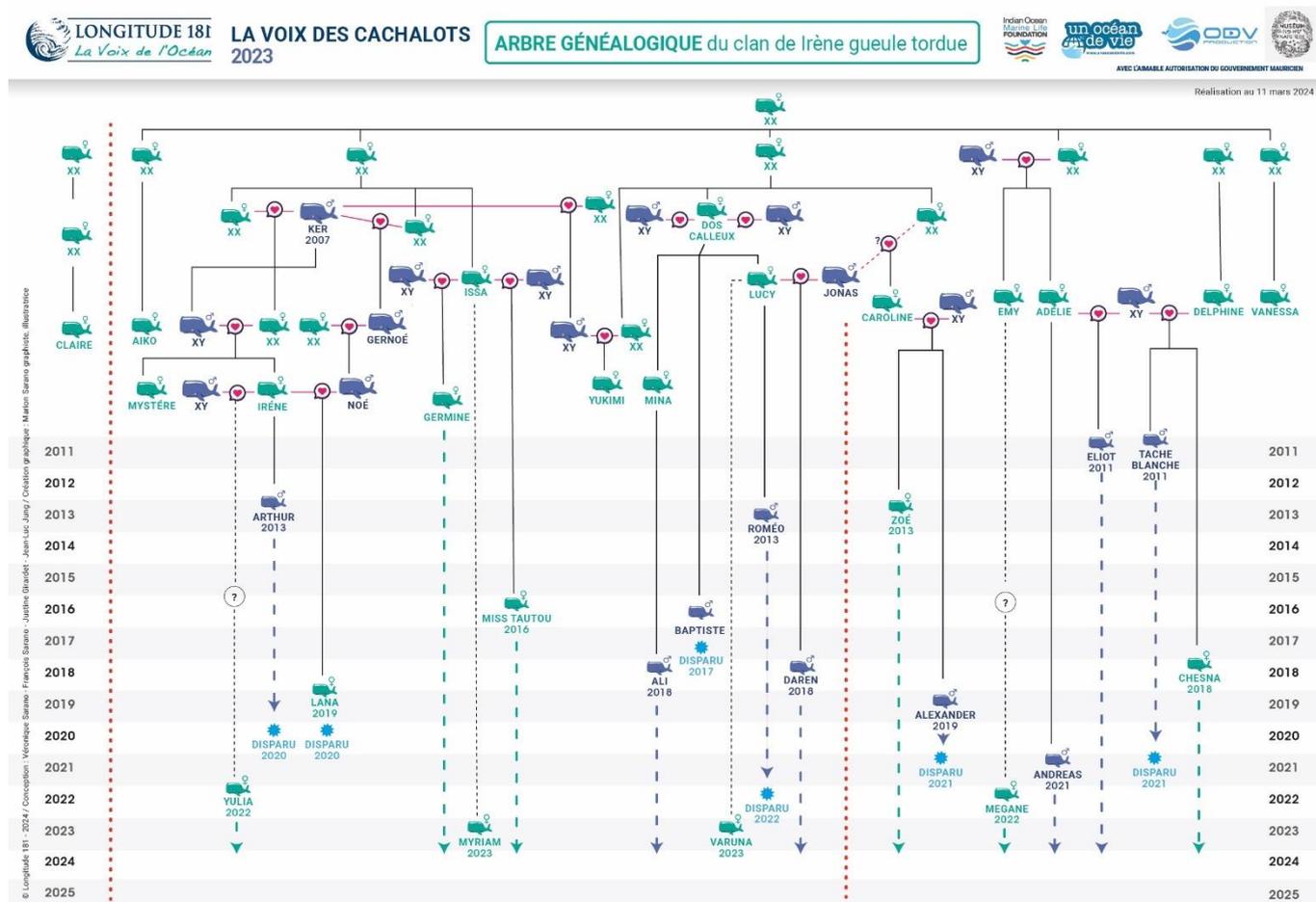


Figure 3 : Arbre généalogique du clan d'Irène Gueule Tordue (F. Sarano, Longitude 181, communication personnelle 2024)

### II.3. Création de la base de données

Cette étude a nécessité la création d'une base de données, à partir de signaux acoustiques recueillis en 2023. Au total, 50 enregistrements audios ont été analysés, sur une période de 23 jours d'observation (de mars à juin 2023). Les statistiques des données analysées sont présentées dans le Tableau 1.

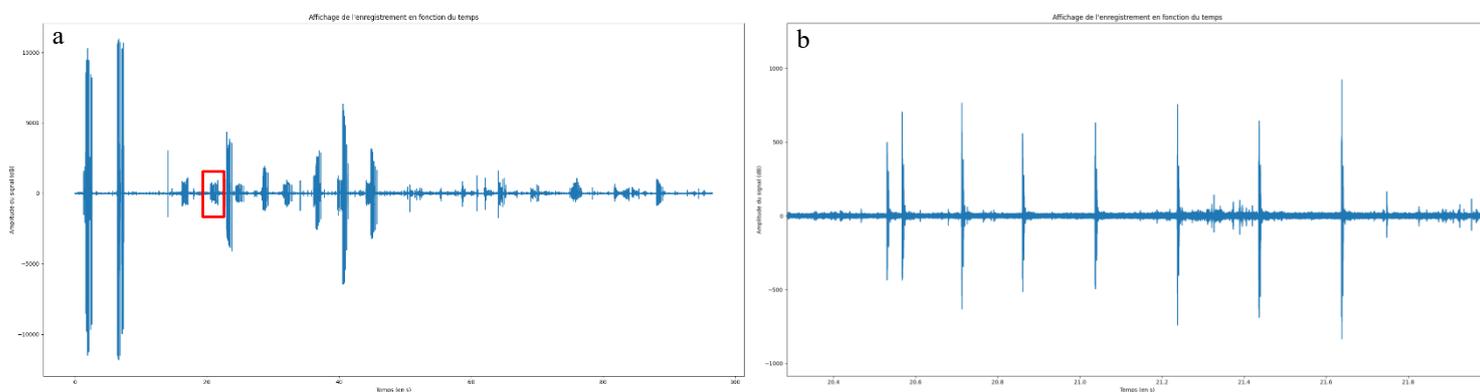
Tableau 1: Statistiques des enregistrements audios analysés

		Unité d'Irène	Unité de Vanessa	Total
Enregistrements analysés		21	29	50
Type d'enregistrement	GoPro	0	23	23
	Antenne OPALE	21	6	27
Jours de rencontres des unités		5	18	23

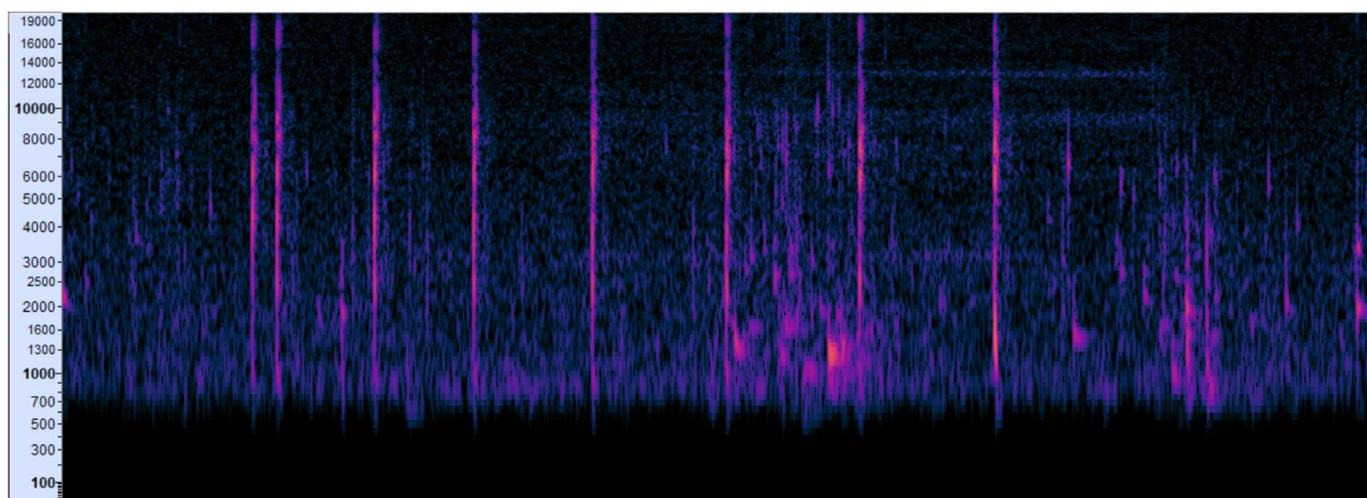
La durée totale des enregistrements s'établissait à 1 heure, 20 minutes et 01 secondes.

Le traitement des signaux acoustiques a principalement été effectué en utilisant le langage Python et le logiciel Audacity. En premier lieu, Python a donné la possibilité d'afficher les enregistrements sous forme d'onde (fig. 4) pour identifier et annoter les codas (début et fin de la coda, nombre de clics).

Une première vérification a été réalisée par l'écoute du son et l'affichage du spectrogramme avec le logiciel Audacity. Cela a permis de corriger si nécessaire les codas mal annotées au départ et de rajouter certaines codas, plus visible à l'aide du spectrogramme.



*Figure 4 : Visualisation avec Python, d'un signal acoustique de cachalot en fonction du temps, enregistré à l'aide de l'antenne OPALE. a) Enregistrement complet contenant 21 codas. B) Zoom sur l'encadré rouge de a), coda à 8 clics.*



*Figure 5 : Affichage du spectrogramme sur Audacity d'une coda à 8 clics (fig. 4, b.)*

Sur l'ensemble des codas identifiées, une détection semi-automatique a été réalisée à l'aide de programmes Python. Ce détecteur prend en compte le nombre de clics identifiés et sélectionne les clics ayant l'énergie la plus importante comme composants de la coda. Cependant, l'énergie variable à l'intérieur d'une même coda peut entraîner des erreurs de détection en cas de chevauchement avec d'autres codas ou de superposition avec d'autres types de vocalises. Nous pouvons observer que sur la figure 6 (b), l'énergie de l'avant-dernier clic étant plus élevée que celle du dernier, le détecteur choisit le mauvais clic.

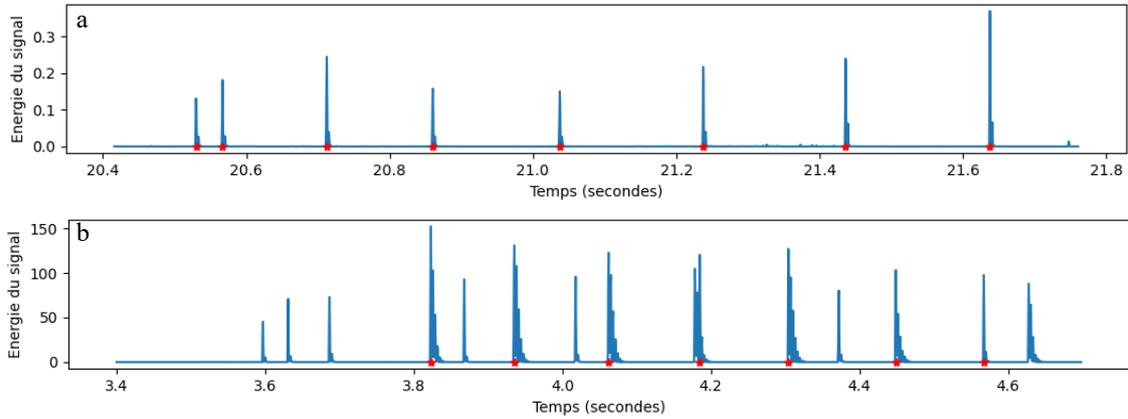


Figure 6 : Détection semi-automatique des clics des codas sur Python (étoiles rouges).  
a) bonne détection des clics d'un coda à 8 clics (fig. 4.b):  
b) mauvaise détection des clics due à une chevauchement de deux codas de 7 clics.

Au total, 526 codas ont été identifiées et annotées. Parmi elles, il y a 397 codas qui ont été validées manuellement, constituant la base de données pour les analyses suivantes. Cette base de données comprenait 222 codas sans chevauchements ni superposition avec d'autres types de vocalises, et 175 codas avec des chevauchements ou des superpositions, mais correctement détectés par le détecteur semi-automatique de clics. Parmi les 129 codas éliminées, 96 présentaient des erreurs de détection au niveau du détecteur de clics, et 33 codas étaient incertaines. Par conséquent, 24,5% des codas de la base de données n'ont pas été utilisés pour les analyses suivantes. Aussi, cette base comprend 206 codas pour l'unité sociale d'Irène, et 191 codas pour l'unité sociale de Vanessa.

Sur l'ensemble de la base de données (397 codas), les positions des clics dans le temps ont été calculés, ainsi que les intervalles inter-clics (ICI), permettant une classification pour déterminer les structures des codas (Weilgard L., et al., 1992). Dans une même coda, les clics ayant un ICI faible, c'est-à-dire, les clics rapprochés dans le temps, sont regroupés en paquets (Coch J., et al. 2023). Ainsi, une coda de cinq clics, où les deux premiers clics sont rapprochés, suivis de trois clics d'intervalles réguliers, est noté 2+1+1+1. Pour classifier les codas en fonction des ICI, un seuil a été défini. D'après, Weilgard L., et al. (1992), si un ICI d'une coda est supérieur à 50% de la moyenne des ICI de la coda, alors, le clic est classé à part (+1). Dans cette étude, une nouvelle méthode de classification des codas, inspirée de la méthode de Weilgard L., et al. (1992) a été réalisée. Il a été décidé que si un ou plusieurs ICI étaient inférieurs à 50% de la moyenne des ICI de la coda, alors, les clics étaient regroupés en paquets. Ainsi, chaque coda de la base a été classée dans un type de structure temporelle. La méthode utilisée est inspirée des publications de Weilgard L., et al. (1992) et Drouot V., et al. (2004), décrite sur la figure 7.

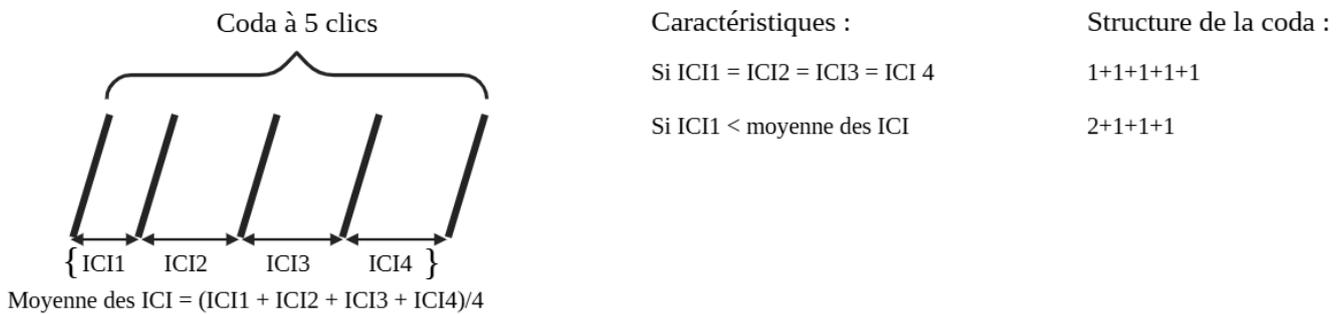


Figure 7 : Illustration schématique de la classification des codas utilisée (exemple d'une coda à 5 clics). Chaque « / » représente un clic.

Pour approfondir les analyses de certaines structures de codas, la durée totale des codas et les ICI normalisés ont également été étudiés pour les structures de codas avec une occurrence élevée dans la base de données. La durée totale d'une coda représente la somme des ICI (Sharma P., et al., 2024). Pour normaliser les ICI,

chaque intervalle inter-clic (ICI) de chaque coda est divisé par la durée totale de cette coda (Sharma P., et al., 2024).

Pour finir, des tests statistiques ont été réalisés. Un test de Shapiro a été systématiquement effectué pour vérifier la normalité des échantillons relatifs au nombre de clics par codas, à la durée des codas et aux ICI normalisés. Si les échantillons suivaient une loi normale, un test de variance était réalisé pour déterminer l'égalité des variances. Les résultats de ce test ont permis de choisir entre le test T de Student ou le test T de Welch. Si les échantillons ne suivaient pas une loi normale, le test de Mann-Whitney-Wilcoxon était utilisé. Ainsi, le test de Welch et le test de Student ont été appliqués respectivement aux données des ICI normalisés et à la durée des codas, tandis que le test de Mann-Whitney-Wilcoxon a été employé pour les échantillons concernant le nombre de clics par coda, ainsi que pour les données relatives à la durée des codas. Pour les structures des codas, un test de normalité n'était pas possible en raison de la nature qualitative des données. Un test du  $\chi^2$  a donc été effectué pour comparer les deux distributions. Afin de déterminer la significativité des tests, un seuil de 5% d'erreur (0,05) a été utilisés pour tous les tests.

### III. Résultats

#### III.1. Nombre de clics par coda

Cette étude vise à examiner toutes disparités dans les répertoires de codas entre les deux unités sociales en question. Pour ce faire, le nombre de clics par coda a tout d'abord été étudié (fig. 8).

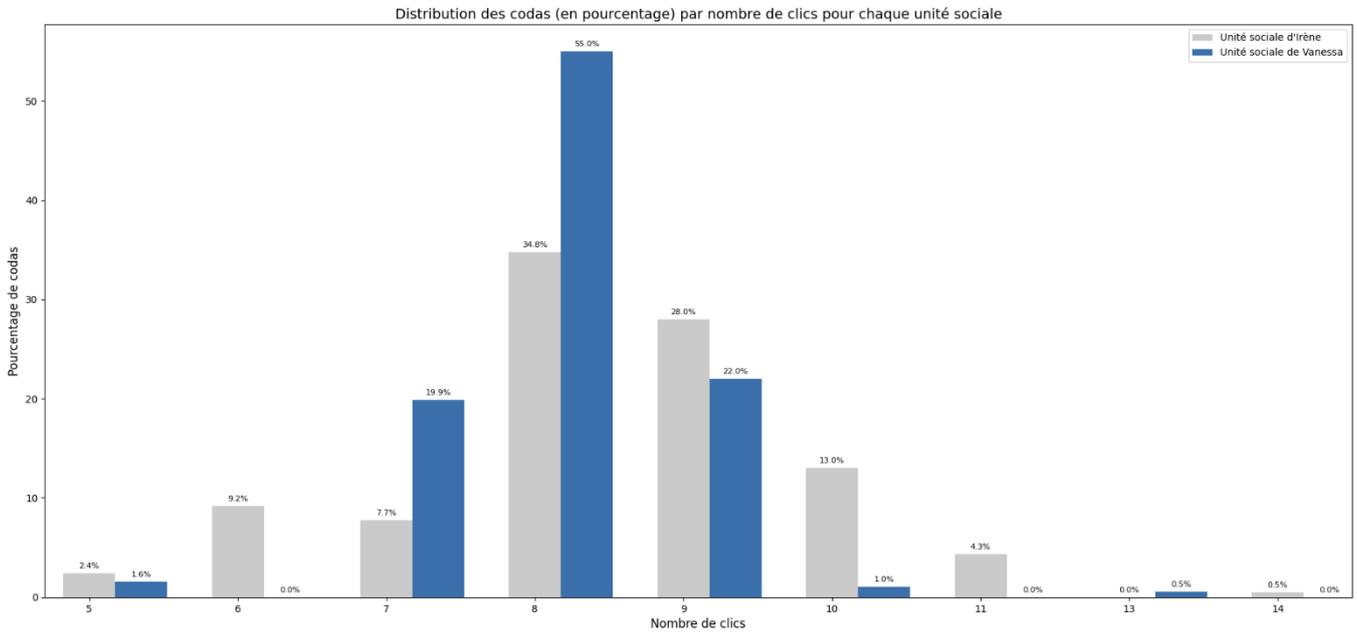


Figure 8 : Histogramme du nombre de codas en fonction du nombre de clics pour chacune des unités sociales

Nous observons une occurrence plus élevée des codas à 8 clics dans la base de données pour les deux unités sociales ( $n=55,0\%$  et  $n=34,8\%$ )(fig. 8). De plus, le répertoire de l'unité sociale d'Irène se concentre sur les codas à 6, 8, 9 et 10 clics alors que pour celui de Vanessa, les codas à 7, 8 et 9 clics sont les plus fréquents. Le test de Mann-Whitney-Wilcoxon n'a révélé aucune différence significative ( $p\text{-value} = 0,4953$ ) (cf. Annexe I). A cette étape de notre étude, les deux unités ne se distinguent donc pas par la répartition en nombre de clics des codas émises.

#### III.2. Structures des codas

Ensuite, les codas ont été classées en types, en fonction de leurs structure (cf. Matériels et Méthodes). A partir de la base de données complète, les codas variaient de 5 à 14 clics, et un total de 28 structures distinctes ont été relevées.

Parmi ces structures, certaines apparaissent moins de deux fois dans la base de données. Autrement dit, elles n'ont été retrouvées qu'une seule fois dans une seule unité sociale. Par conséquent, ces structures ont été exclues ( $n=7$ ) de la figure 9 afin de mettre en évidence les structures les plus représentées ( $n=21$ ) dans chaque unité sociale, tout en étant conservées pour les analyses statistiques.

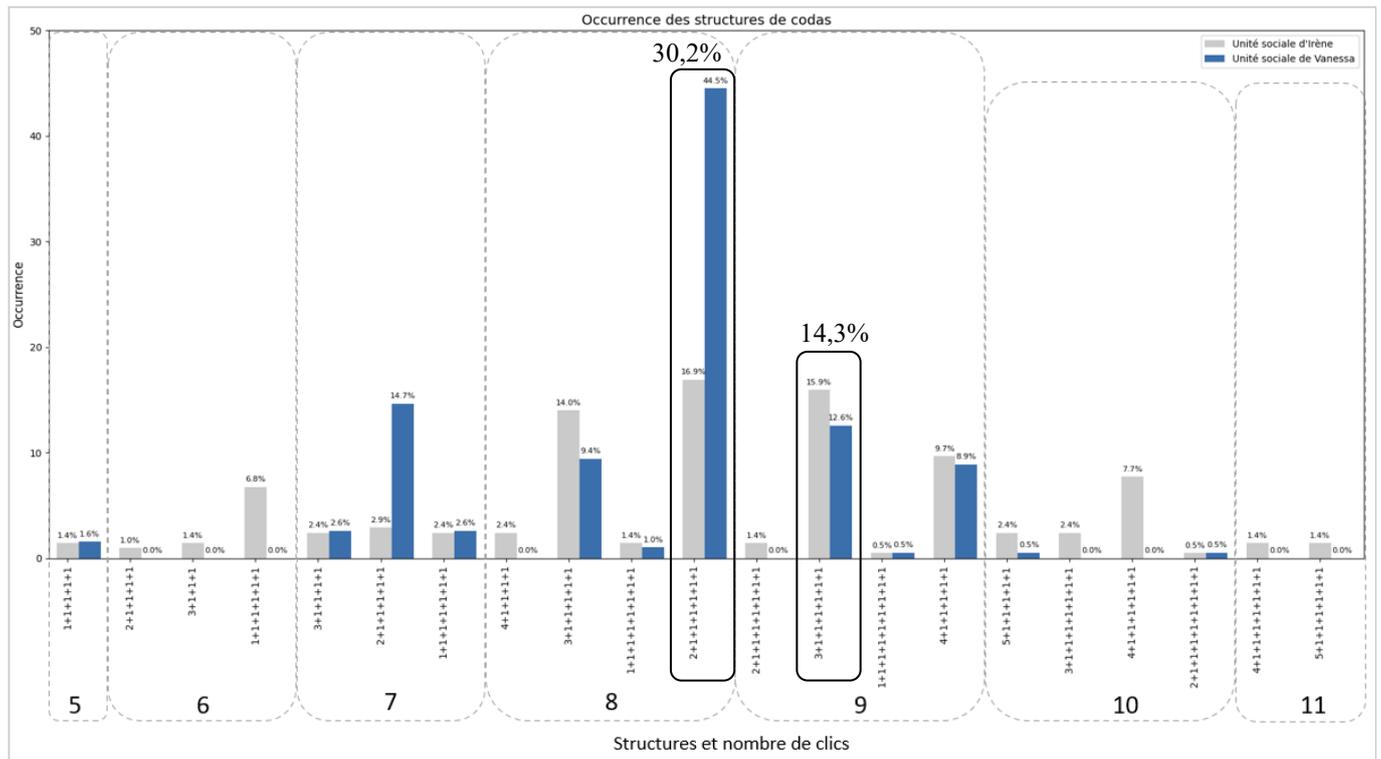


Figure 9 : Histogramme reprenant les occurrences des vingt et une structures de codas représentées au moins 2 fois dans la base de données. Les structures sont réparties par ordre croissant en fonction du nombre de clics

Nous observons une occurrence plus élevée de certaines structures de codas au sein de la base de données (fig. 9). Les deux structures avec la plus grande occurrence sont la 2+1+1+1+1+1 (8 clics) (n=30,2%) et la 3+1+1+1+1+1 (9 clics) (n=14,3%). La fréquence des structures émises varie également selon l'unité. En effet, pour l'unité sociale d'Irène, les trois codas les plus représentés sont celles du types 2+1+1+1+1+1 (8 clics) (n=16,9%), 3+1+1+1+1+1 (9 clics) (n=15,9%) et celles du types 3+1+1+1+1+1 (8 clics) (n=14,0%). Pour l'unité sociale de Vanessa, les deux codas les plus représentés sont celles du type 2+1+1+1+1+1 (8 clics) (n=44,5%), et celle du type 2+1+1+1+1+1 (7 clics) (n=14,7%). Comme vu précédemment, les structures de coda à 8 clics restent majoritaires dans la base de données (n=44,58%). De plus, la structure 2+1+1+1+1+1 est principalement émise par l'unité de Vanessa.

Nous observons que la distribution des structures de codas utilisées est plus dispersée pour l'unité sociale d'Irène. En effet, l'unité d'Irène compte 27 structures de codas différentes alors que celle de Vanessa en compte seulement 13. Seulement une seule structure est uniquement émise par l'unité de Vanessa (3+1+1+1+1+1+1+1+1+1 - 13 clics) et n'est retrouvée qu'une seule fois dans la base de données.

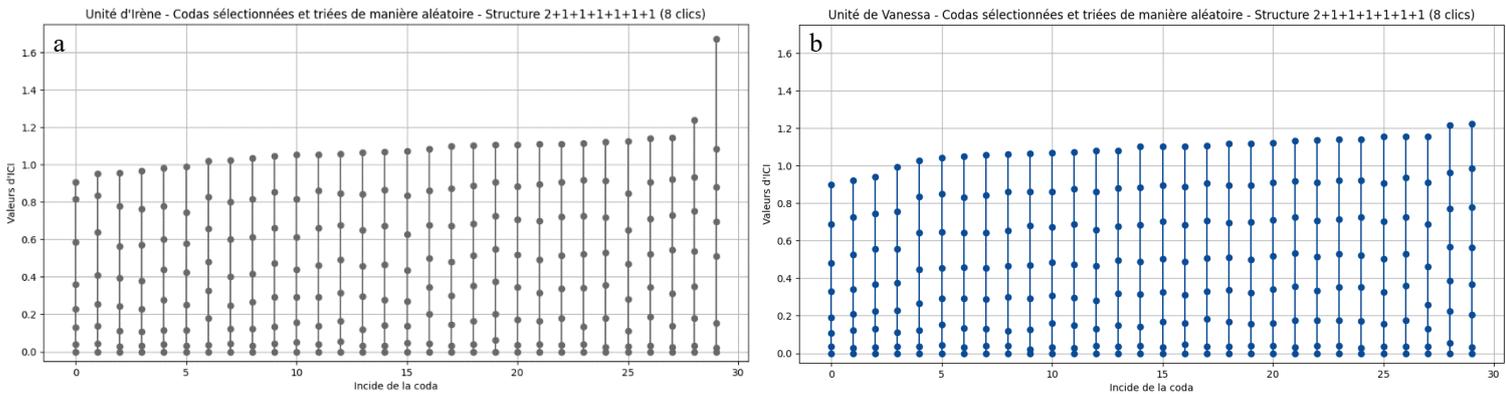
Ainsi, bien que les deux répertoires partagent des codas communes (n=12), il semble qu'il existe néanmoins une différence dans les proportions des codas utilisées. Ces résultats ont été confirmés par le test statistique du Chi<sup>2</sup> (p-value : 8,817.10<sup>-12</sup>) (cf. Annexe I). Le résultat du test suggère qu'il existe une différence significative dans la répartition des structures de codas utilisées par les deux unités.

Il semble donc bien qu'il existe une différence dans la communication des individus des unités sociales d'Irène et de Vanessa. Cependant, aucune différence n'est observée dans la répartition par nombre de clics. Pour aller plus loin, les analyses ont été approfondies en étudiant les variabilités intra-types et la distribution des intervalles inter-clics des codas, ce qui pourrait permettre de mieux caractériser cette différenciation vocale entre les deux unités en mettant en avant des distributions de mesures afin de savoir si cela révèle des modes et/ou des clusters distincts pour les durées et les ICI normalisés des codas.

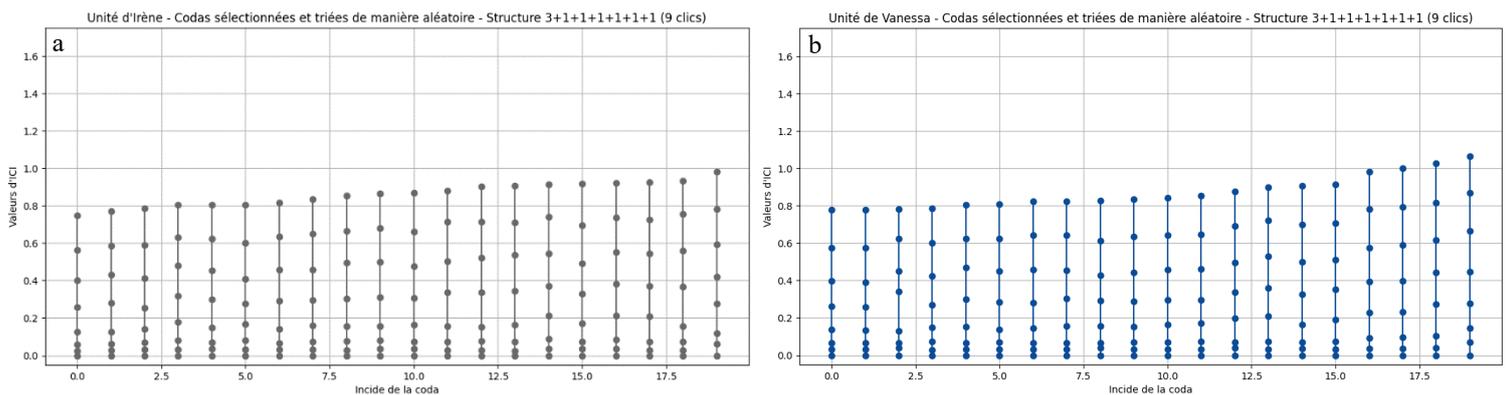
### III.3. Structures temporelles et intervalles inter-clics normalisés

#### III.3.1. Variabilité intra-type

Pour les analyses suivantes, nous nous sommes concentrées uniquement sur les deux structures de codas les plus représentées dans la base de données :  $2+1+1+1+1+1+1$  ( $n=35$  et  $n=85$ ) et  $3+1+1+1+1+1+1$  ( $n=33$  et  $n=24$ ). Ce choix s'explique principalement par le nombre plus élevé de codas enregistrées pour ces structures par rapport aux autres. Seuls ces types de codas sont assez représentés pour rechercher une variabilité temporelle fine intra-coda.



*Figure 10 : Représentation des codas à 8 clics du type  $2+1+1+1+1+1+1$  en fonction des valeurs de leur ICI pour a) l'unité sociale d'Irène et b) l'unité sociale de Vanessa. Les points représentent les clics et les barres les ICI entre chaque clic.*



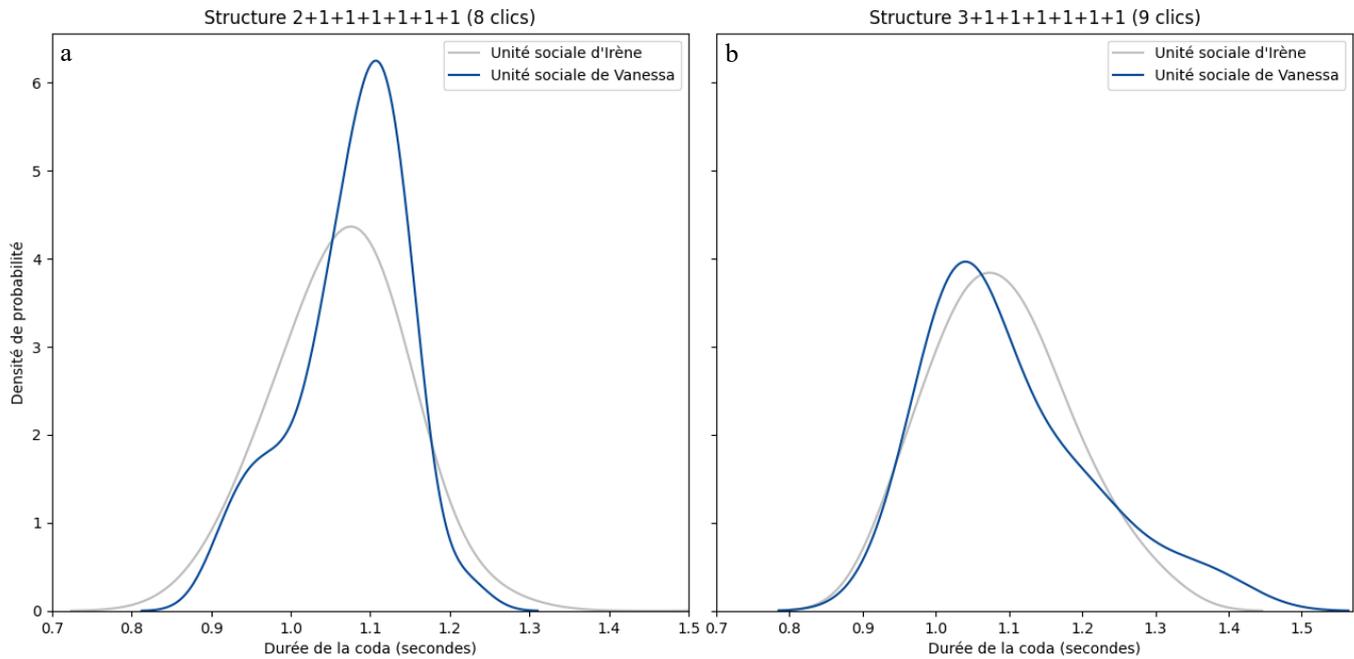
*Figure 11 : Représentation des codas à 9 clics du type  $3+1+1+1+1+1+1$  en fonction des valeurs de leur ICI pour a) l'unité sociale d'Irène et b) l'unité sociale de Vanessa. Les points représentent les clics et les barres les ICI entre chaque clic.*

Les figures 10 et 11 représentent un extrait des codas les plus représentées de la base de données, pour chaque unité. Du fait que ces structures ne possèdent pas la même occurrence dans les deux unités sociales, une sélection aléatoire d'un nombre choisi de codas a été réalisée. Cela a permis de faire correspondre le nombre de codas entre les deux unités pour une structure donnée. Les codas ont également été classés dans l'ordre croissant selon leur durée totale.

Nous constatons que, pour une même structure, les valeurs d'ICI varient, ainsi que de la durée totale de la coda (fig.10 et 11). Par conséquent, nous avons d'abord étudiées les structures temporelles précises de ces types de codas afin d'essayer de savoir s'il existe une différence temporelle fine entre les unités sociales pour les codas de même structure. Ensuite, nous avons normalisés les ICI afin de voir la forme de la distribution et d'identifier s'il existe des modes ou des clusters distincts pour les deux unités.

### III.3.2. La durée totale des codas

La durée totale d'une coda est définie comme la somme des ICI (Sharma P., et al., 2024). La densité de probabilité du nombre de codas trouvées pour chaque durée de codas a été tracée pour les deux structures de la figure 12.

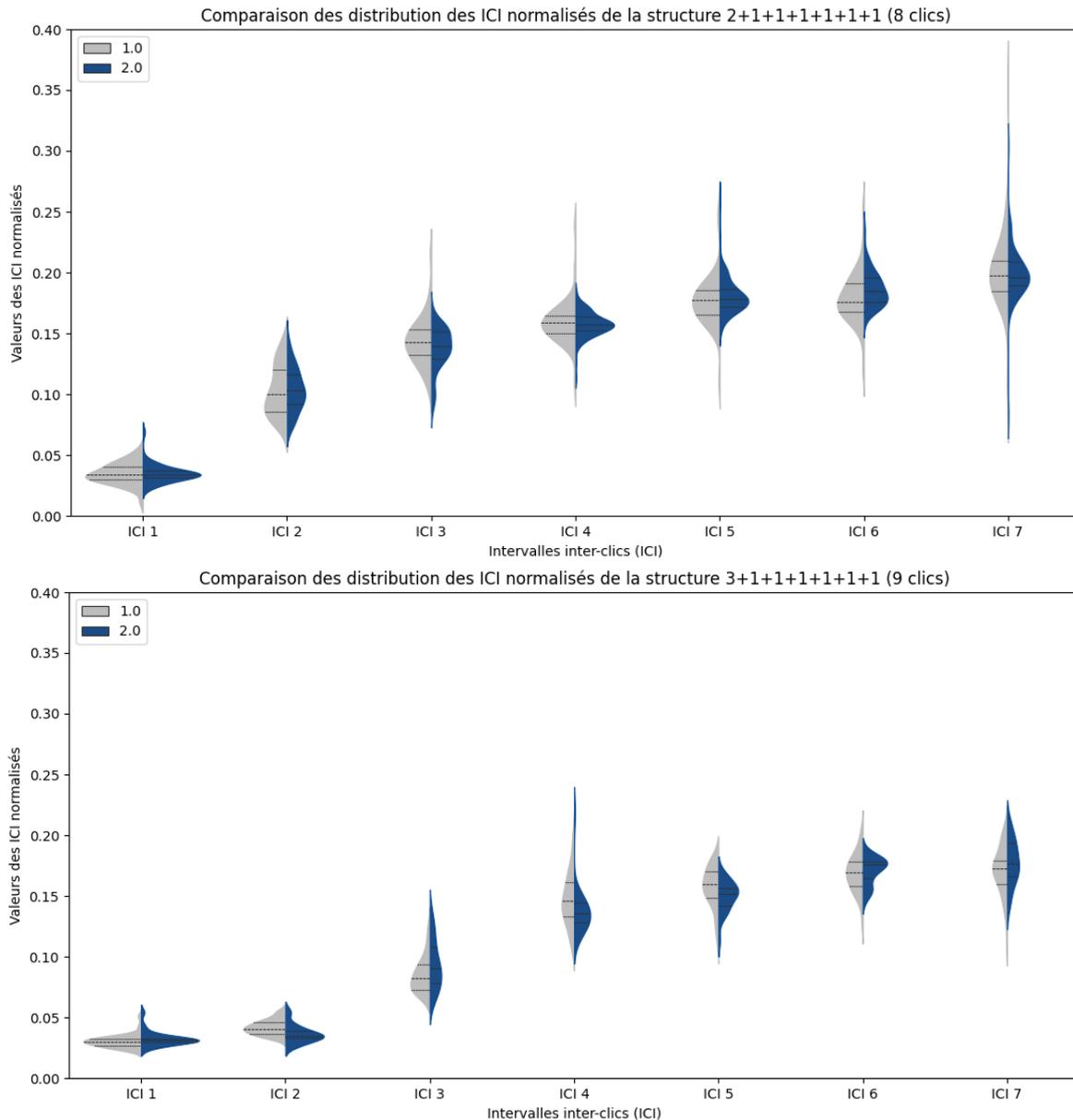


*Figure 12 : Densité de probabilité des structures de codas en fonction de la durée totale de la coda. a) Structure de coda 2+1+1+1+1+1+1 ; b) Structure de coda 3+1+1+1+1+1+1*

Sur la figure 12, nous pouvons observer une distribution unimodale des courbes, avec une densité de probabilité plus élevée pour l'unité de Vanessa en (a). La durée totale des codas varie de 0,8985 à 1,6 secondes pour la structure 2+1+1+1+1+1+1 (a) et de 0,9225 à 1,3885 secondes pour la structure 3+1+1+1+1+1+1 (b). Pour la structure 2+1+1+1+1+1+1, le test de Mann-Whitney-Wilcoxon n'a pas indiqué de différence significative entre les deux unités (p-value : 0,1086) (cf. Annexe I). De même, pour la structure 3+1+1+1+1+1+1, le test T de Student n'a pas révélé de différence significative (p-value : 0,9356) (cf. Annexe I). Ainsi, pour les codas de structure 2+1+1+1+1+1+1 et 3+1+1+1+1+1+1, les durées totales ne semblent pas différer d'une unité sociale à l'autre.

### III.3.3. Les ICI normalisés

Les ICI ont été normalisés en les divisant par la durée totale de la coda. Nous représentons donc la proportion de chaque ICI dans la coda, pour chacune des structures (fig. 13).



*Figure 13 : Diagramme en violon comparant la distribution des ICI normalisés pour la structure de coda 2+1+1+1+1+1+1 (8 clics) et 3+1+1+1+1+1+1 (9 clics) entre les deux unités (1 : Unité d'Irène, 2 : Unité de Vanessa)*

Concernant les ICI normalisés, le test de Welch a indiqué que les valeurs d'ICI normalisées des codas de structure 2+1+1+1+1+1+1 et 3+1+1+1+1+1+1, ne différaient pas d'une unité sociale à l'autre (p-value : 0,5978 et 0.5974) (cf. Annexe I). Cela semble indiquer qu'il n'y a également pas de différence significative dans les valeurs d'ICI normalisés entre les deux unités sociales.

Il ne semble donc pas que les variations d'ICI des codas de même structure soient due à une différence de durée totale ou d'ICI normalisés.

## IV. Discussion

Cette étude s'est concentrée sur l'analyse des répertoires de codas de deux unités sociales distinctes récemment séparées faisant partie du clan d'Irène Gueule Tordue. L'objectif principal était de déterminer s'il existait des différences significatives dans les répertoires de codas entre ces deux unités. Les analyses ont également porté sur d'autres variables internes aux codas afin d'identifier si des variations temporelles fines (variabilité intra-type, durée totale des codas) et des variabilités au niveau des intervalles inter-clics normalisés pouvaient être détectées à l'intérieur des structures de codas.

Nos résultats confirment la prédominance de la structure de coda 2+1+1+1+1+1 (8 clics) (Berkenbaum L., 2021 ; Coch J., et al., 2023 ; Huijser Léonie A. E., 2020), mais des différences ont été observées dans la fréquence et la diversité des structures utilisées par chaque unité sociale. Nous pourrions nous demander si l'unité d'Irène possède un répertoire plus riche que l'unité de Vanessa en raison de la plus grande diversité de structures enregistrées. Une des hypothèses qui pourrait expliquer ces différences est qu'une possible différenciation des répertoires des codas commence à apparaître entre les deux unités sociales. Ainsi, cette disparité pourrait être attribuée à une évolution progressive des répertoires. Cependant, ces résultats peuvent également être le fruit de différences d'échantillonnage, de conditions d'acquisition des données ou alors de contextes sociaux. Une autre hypothèse à considérer est que ces différences peuvent être attribuées à d'autres facteurs contextuels, comportementaux, ou encore à une variabilité individuelle.

De plus, la composition des deux structures sociales n'est pas la même. Les codas étant principalement émises par les femelles adultes dans les groupes matrilineaires, le groupe qui est constitué par un plus grand nombre de femelles adultes, pourrait, si ce répertoire est une caractéristique individuelle, présenter une plus grande diversité de codas (Marcoux et al., 2006). Ainsi, étant donné que l'unité sociale d'Irène contient plus de femelles adultes, il se peut que son répertoire soit plus riche et diversifié.

Ensuite, il existe une différenciation importante au niveau des âges des juvéniles (et des sexes) pour les deux unités sociales pour l'année 2023, il y a des individus plus âgés dans l'unité sociale de Vanessa et deux nouveau-nées dans l'unité d'Irène.

Ainsi, il est donc possible que cette différence observée au niveau des répertoires de codas soit également le fruit de la composition des deux unités sociales.

Les répertoires de codas des groupes de cachalots varient selon le groupe social et la région (Coch J., et al., 2023). Chaque groupe d'une même région possède des caractéristiques acoustiques et linguistiques spécifiques, avec un ensemble de structures de codas propres à un répertoire et donc à un groupe social (Coch J., et al., 2023). Par exemple, la différence de structure, pourraient indiquer des nuances dans la manière de communiquer au sein de chaque unité sociale. Ainsi, nous pouvons émettre l'hypothèse que cette différence pourrait être attribuées à une divergence des répertoires. À l'avenir, cette situation pourrait entraîner une différenciation plus prononcée des répertoires de codas au sein de ces unités, ce qui laisse penser qu'elles pourraient développer des répertoires distincts (Hersh T.A., et al., 2022).

D'autre part, des biais ont potentiellement influencé les résultats. En effet, notre base de données est réduite (526 codas) et presque 25% n'ont pas été utilisés en raison d'erreurs de détections, laissant 397 codas pour l'étude des répertoires des deux unités. La petite taille de nos échantillons est responsable d'une forte fluctuation d'échantillonnage qui réduit la significativité des différences observées. De plus, l'analyse étant restreinte à l'année 2023, il n'est pas possible de déterminer si une différenciation progressive des répertoires de codas s'est opérée au fil des années.

Ensuite, le nombre de codas étudiées n'est pas homogène entre les deux unités sociales. Il y a plus de codas enregistrées dans l'unité sociale d'Irène (n=206) que dans l'unité de Vanessa (n=195). Cela peut causer un biais dans la détermination des occurrences des structures de codas mais également lors des tests statistiques.

Les résultats de cette étude soulignent la complexité de la communication acoustique chez les cachalots et ouvrent la voie à des recherches futures. Celles-ci pourraient confirmer nos hypothèses et explorer les causes sous-jacentes des similitudes et des différences dans les répertoires, afin de mieux comprendre la dynamique sociale et les stratégies de communication des cachalots. A l'avenir, il serait intéressant d'explorer plus en détail les répertoires avant, pendant et après la séparation présumée du clan d'Irène Gueule Tordue, en ajoutant plus d'informations à notre base de données. Nous pourrions également intégrer les données comportementales grâce aux vidéos réalisées avec les caméras GoPro lors des enregistrements. Enfin, nous pourrions approfondir l'identification individuelle en utilisant l'âge, le sexe, les liens familiaux (Girardet J., et al., 2022 ; Sarano V. et al., 2022 ; Sarano F. et al., 2023), ou encore les intervalles inter-pulses (IPI) et l'indentification du locuteur avec l'antenne acoustique OPALE (Glotin H., et al., 2024).

Pour finir, cette étude met en lumière la richesse et la diversité des répertoires de codas des cachalots de l'Île Maurice et leur importance dans la communication et les interactions sociales. Cependant, il reste encore beaucoup à faire pour mieux comprendre les dynamiques complexes de la communication de ces animaux.

## V. Perspectives

Pour approfondir notre étude, une première exploration de la variabilité individuelle et contextuelle a été réalisée, en étudiant les comportements et les signaux acoustiques de deux femelles adultes connues, en interaction dyadique régulière.

Vivant une grande partie de leur vie en groupe, les femelles adultes peuvent consacrer jusqu'à 25% de leur temps aux interactions sociales avec leur congénères (Goddard N., 2015 ; Whitehead H., 2003). Les interactions jouent donc un rôle important dans les comportements sociaux des cachalots (Berkenbaum L., 2021). Whitehead (2008) définit une interaction comme une action d'un animal dirigée vers un autre ou affectant le comportement d'un autre. Un répertoire des comportements et des interactions sociale des cachalots de l'Île Maurice a d'ores et déjà été réalisé, incluant notamment les contacts physique entre individus, ou encore les interactions dites dyadique (Berkenbaum L., 2021 ; Sarano F. et al., 2019). Une dyade se compose de deux individus séparés par une distance inférieure à la taille d'un cachalot adulte ou en contact physique (Berkenbaum L., 2021). Ces interactions peuvent se produire entre deux juvéniles, deux femelles adultes, ou entre une femelle adulte et son veau (Berkenbaum L., 2021 ; Sarano F., 2019).

Cette étude s'est portée sur une dyade de deux femelles adultes de l'unité sociale de Vanessa, Caroline et Delphine (cf. Annexes II), observées pour la première fois respectivement en 2012 et 2011. Comme tous les cachalots du clan matrilineaire d'Irène Gueule Tordue, ces deux femelles partagent le même ancêtre commun (Girardet J., et al., 2022 ; Longitude 181, 2015; Sarano F., et al., 2021; Sarano V., 2022). Cependant, elles ne possèdent pas de lien de parenté direct.

Depuis longtemps, les observateurs ont noté une proximité marquée entre ces deux femelles. Une analyse des interactions dyadiques de 2017 à 2019 a confirmé des liens sociaux forts entre elles (Berkenbaum, 2021).

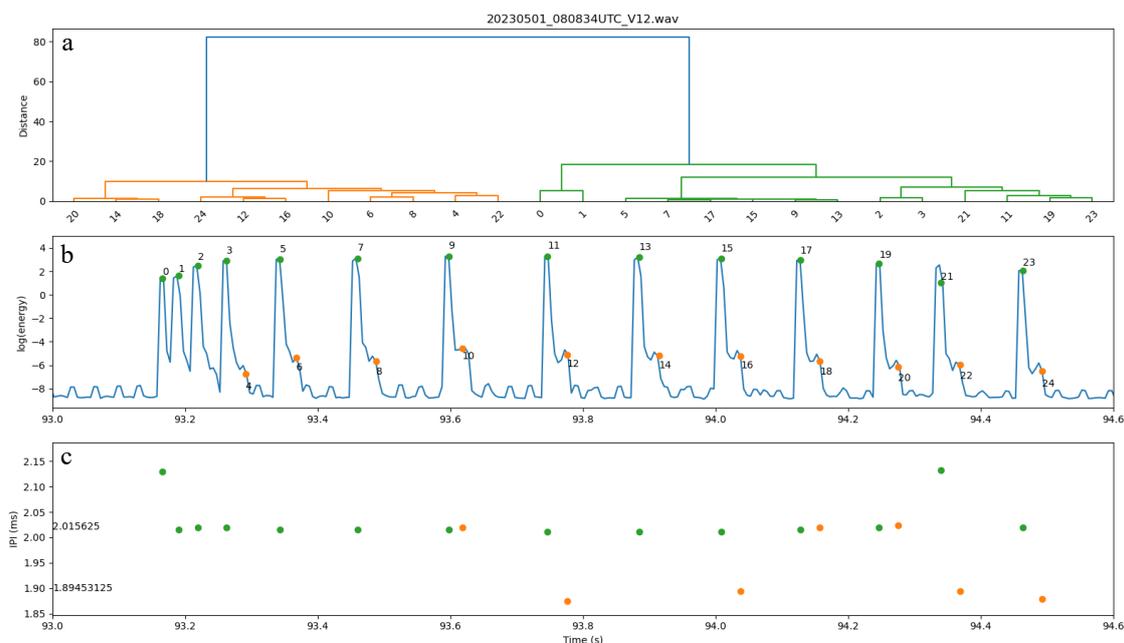
Les dyades entre femelles adultes peuvent présenter des interactions de nature sexuelle, telles que des contacts entre les fentes génitales ou entre les fente génitale et la nageoire dorsale. Ces comportements sont classifiés comme des comportements dits sociaux-sexuels (Sarano F. et al., 2019). Cette étude s'est focalisée sur la variabilité individuelle et comportementale, en mettant particulièrement l'accent sur l'analyse de ces interactions spécifiques entre deux femelles adultes.

Au total, 24 enregistrements audio-vidéos avec Caroline et Delphine identifiées ont été analysés plus précisément. Parmi ceux-ci, 18 enregistrements contenaient des codas et 14 ont été sélectionnés pour l'analyse de la dyade. En effet, dans ces enregistrements, Caroline et Delphine sont en dyade ou en triade avec des jeunes ou des immatures. Tous enregistrements avec la présence d'autres femelles adultes de l'unité sociale ont été mis de côté pour éviter toute possible ambiguïté.

Ces 14 vidéos ont permis d'identifier et d'annoter 83 codas. Parmi ces codas, 62 ont été validés et utilisés pour constituer la base de données pour les analyses. Cette base comprenait 39 codas sans chevauchements ni superpositions avec d'autres types de vocalises, et 23 codas avec des chevauchements ou des superpositions correctement détectées par le détecteur de clics. Parmi les 21 codas éliminés (25,3% de la base de données), 20 présentaient des erreurs de détection, et 1 était incertaine.

Parmi les 83 codas annotées, il a été possible d'identifier le locuteur pour 60 d'entre elles. Cela a été possible grâce à un programme de calcul des intervalles inter-pulses (IPI) et à la connaissance des valeurs d'IPI de chaque individu du groupe social (Ferrari et al., 2023).

Une méthode de séparation des clics a été mise en place pour valider chaque coda annotée, en éliminant l'ambiguïté liée aux codas chevauchées. Ce programme a permis de détecter les clics et, en cas de chevauchement de plusieurs codas, d'attribuer chaque clic aux codas correspondantes (Ferrari et al., 2023). De cette manière, les deux codas chevauchées illustrées ci-dessous ont pu être séparées, et chaque clic a été correctement attribué (fig. 14.a et 14.b). Cette séparation des codas chevauchées a principalement permis de lever l'ambiguïté dans le calcul des intervalles inter-clics (IPI), facilitant ainsi la possible identification des locuteurs (fig. 14.c).



*Figure 14 : Arbre de distance et intensité en fonction du temps pour deux codas chevauchées de l'enregistrement audio 20230501\_080834 (14.a et 14.b). IPI correspondants à chaque coda (14.c) (© Glotin Clara)*

Ensuite, pour chaque vidéo étudiée, la séquence de comportement a également été décortiquée en se basant sur un répertoire comportemental présenté dans Berkenbaum (2021), reprenant six grandes catégories de comportements tels que ceux dit de “contact”. Les comportements de contact correspondent à des touches physiques entre les individus et sont également divisés en plusieurs types, comme par exemple Dos-Ventre (le dos de l'individu A touche le ventre de l'individu B), Queue-Queue (la queue de l'individu A touche la queue de l'individu B), etc.

De plus, les positions relatives de l'individu A par rapport à l'individu B avant, pendant et après l'interaction socio-sexuelle, a également été annotée. Les positions relatives correspondent par exemple à “côte à côte” (l'individu A est à la même profondeur que l'individu B), “au-dessus et en dessous” (l'individu A est au-dessus de l'individu B), etc (Berkenbaum L., 2021).

Ainsi, pour chaque coda annotée, le type de contact a été déterminé ainsi que la position relative des deux femelles.

Pour finir, l'accent est porté sur un dialogue entre les deux femelles, présentant le comportement spécifique étudié (Vidéo : 20230519\_GX011654\_5C\_caroline\_delphine.MP4 ; Date : 19/05/2023 ; GoPro : GX011654 ; Durée : 00:01:51 ; Individus : Caroline et Delphine ; Interaction : Comportement socio-sexuel). Ainsi, cette séquence représente une conversation entre Caroline et Delphine, comprenant 18 codas. Les IPI ont permis de déterminer l'ordre de « parole » des deux femelles dans la conversation.

### V.1. Caractérisation de la variabilité individuelle

Pour commencer, l'analyse des vidéos de la dyade Caroline-Delphine a permis d'examiner la répartition des codas en fonction du nombre de clics chez les deux femelles adultes (fig. 15). Il a été observé qu'elles émettent exclusivement des codas de 7, 8 ou 9 clics, avec une prédominance des codas à 8 clics, représentant environ 50 % pour chacune d'elles.

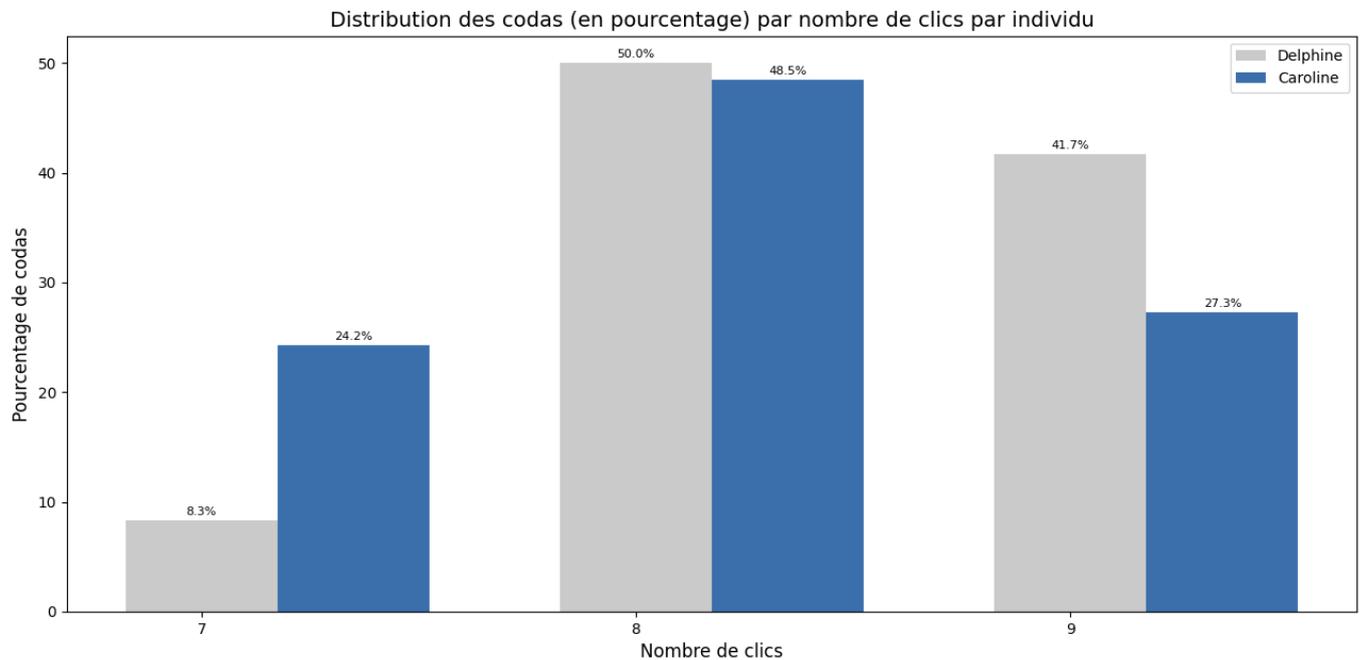


Figure 15 : Histogramme du nombre de codas en fonction du nombre de clics pour chaque individu étudiées

Ensuite, les structures des 45 codas a été déterminées, révélant que seulement 5 structures distinctes sont émises par les deux femelles (fig. 16).

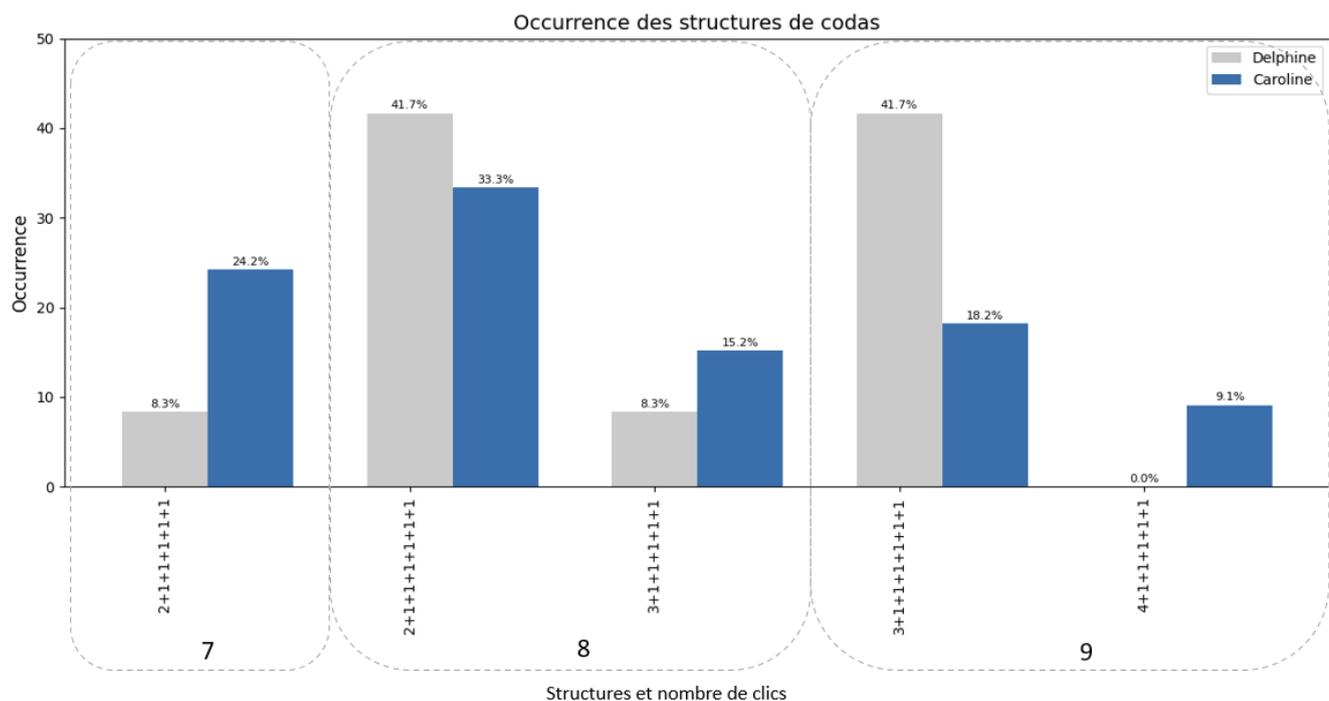
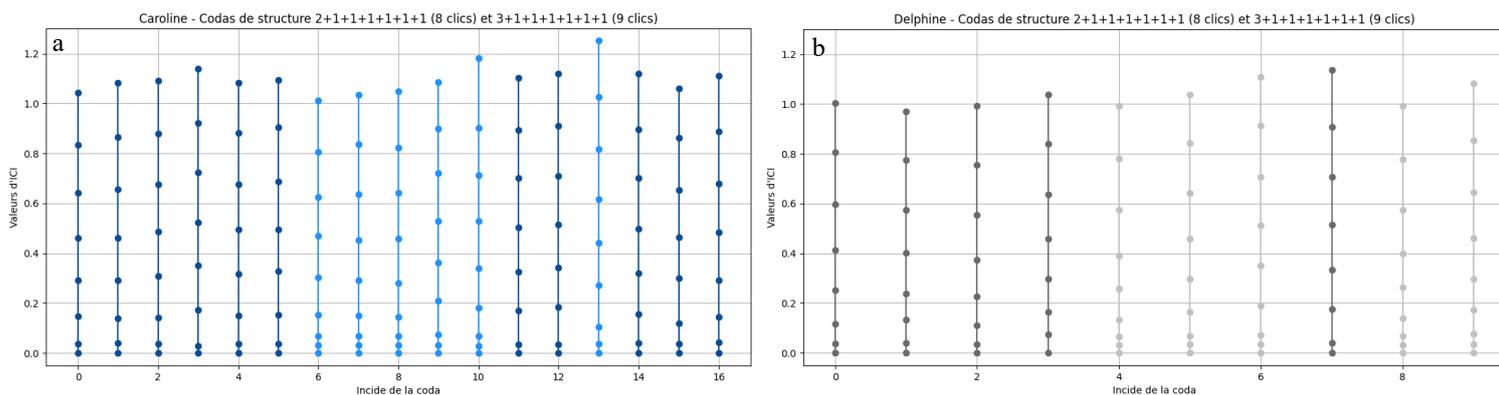


Figure 16 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par les deux femelles adultes étudiées. Les structures sont réparties par ordre croissant en fonction du nombre de clics

La structure de codas la plus souvent émises par les deux femelles adultes est de nouveau la structure 2+1+1+1+1+1 (8 clics) (n=35,56%). La structure 3+1+1+1+1+1 (9 clics) est également régulièrement émises, notamment par Delphine (n=41,7%). Par ailleurs, Caroline semble se distinguer par l'émission fréquente de codas de structure 2+1+1+1+1+1 (7 clics) (n=24,7%).

Par ailleurs, comme précédemment, nous pourrions nous interroger sur l'existence d'une variabilité individuelle au sein des codas de structure similaire. Pour les deux structures de codas les plus représentées dans la base de données, on observe des variations temporelles plus précises (fig. 17). En effet, pour des codas de même structure, la durée totale de la coda ainsi que les valeurs d'ICI semblent varier, que ce soit

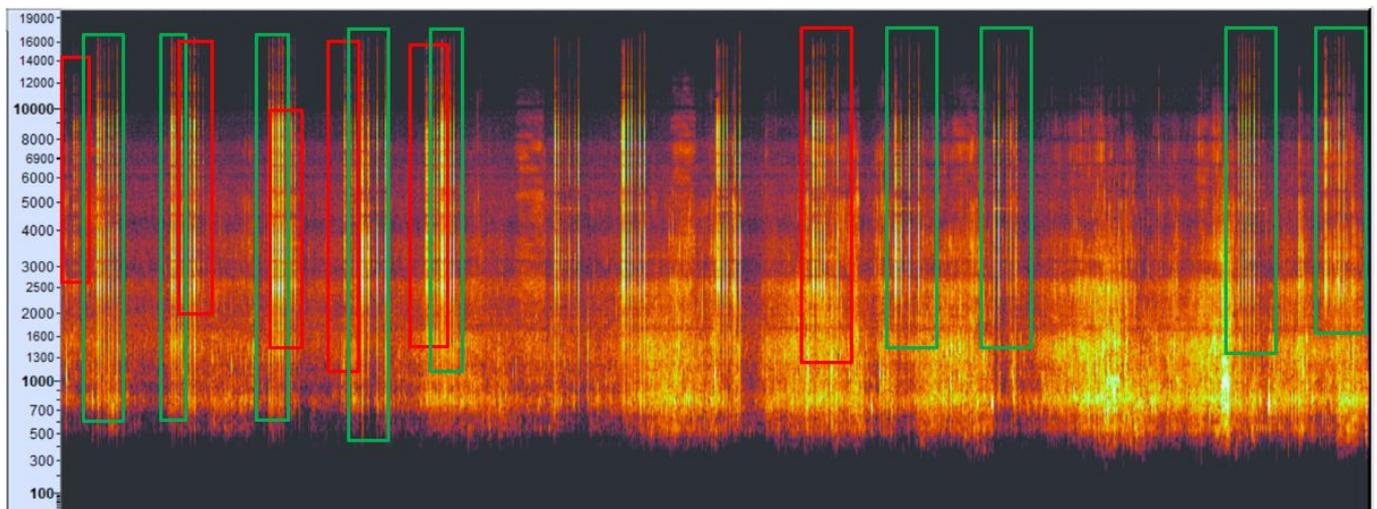
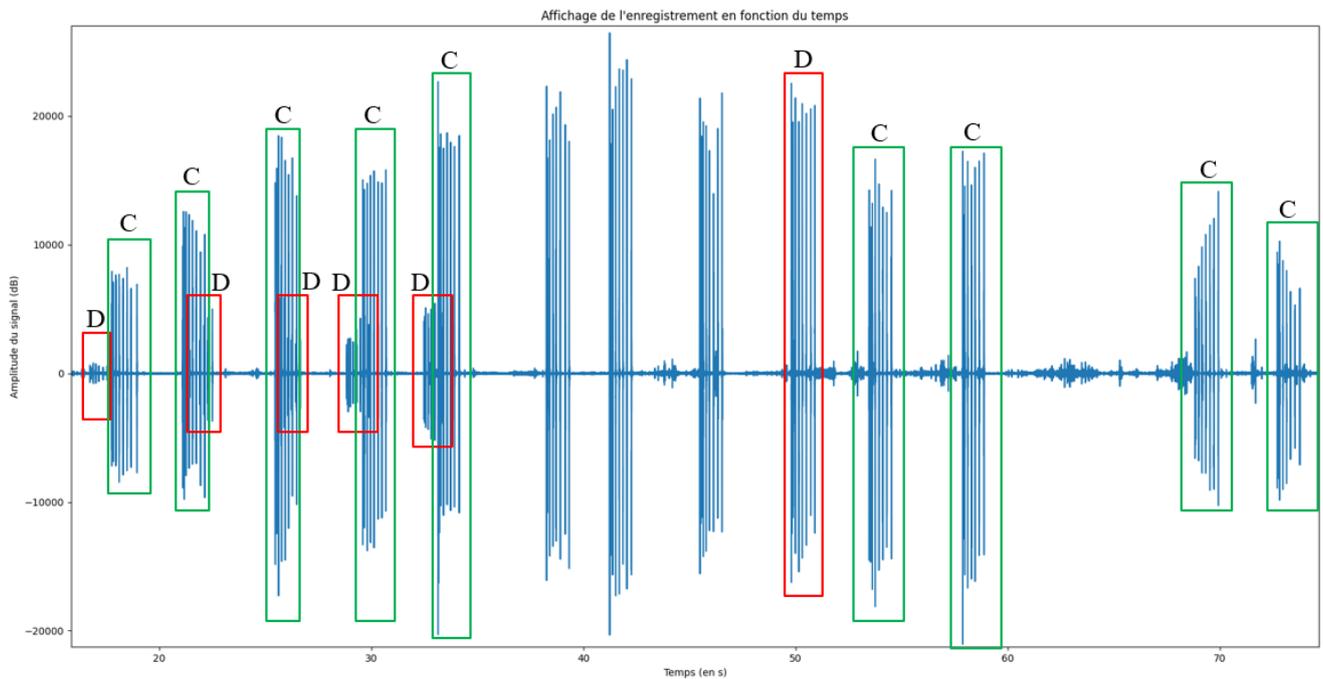
pour un même individu ou entre deux individus. Par exemple, les codas à 9 clics émisés par Delphine montrent une durée totale comprise entre 1,0 et 1,1 seconde (fig. 16.a, gris clair), tandis que ceux de Caroline, semble avoir une durée totale pouvant aller jusqu'à plus de 1,2 secondes (fig. 16.b, bleu clair).



*Figure 17 : Représentation des codas de structure 2+1+1+1+1+1+1 et 3+1+1+1+1+1+1 des deux femelles adultes étudiées. a) 2+1+1+1+1+1+1 : bleu foncé, 3+1+1+1+1+1+1 : bleu clair et b) 2+1+1+1+1+1+1 : gris foncé, 3+1+1+1+1+1+1 : gris clair*

## V.2. Caractérisation d'un dialogue entre les deux femelles

L'analyse d'un enregistrement de la dyade Caroline – Delphine contenant 18 codas a permis de décrire le dialogue entre les deux femelles adultes. Grâce au calcul de l'IPI, le locuteur a été estimé pour 15 codas. Pour les trois restant, le calcul de l'IPI ne nous a pas permis d'estimer le locuteur. Ainsi, nous avons pu déterminer l'ordre de « parole » de chaque individu et le nombre de codas émisés par chacune (fig.18).



*Figure 18 : Conversation de 18 codas entre Delphine et Caroline. L'ordre des codas a été déterminé à l'aide de la détermination des IPI (encadré rouge : Delphine, encadré vert : Caroline)  
(Vidéo : 20230519\_GX011654\_5C\_caroline\_delphine.MP4 ; Date : 19/05/2023 ; GoPro : GX011654 ; Durée : 00:01:51 ; Individus : Caroline et Delphine ; Interaction : Comportement socio-sexuel)*

La série de codas présentée ici comprend toutes les codas enregistrées dans cette vidéo. Il a été observé que Delphine émet la première coda légèrement avant le premier contact, et Caroline réagit immédiatement après. De plus, Caroline émet davantage de codas que Delphine dans cet enregistrement : sur les 15 codas capturées, 6 sont attribuées à Delphine et 9 à Caroline. Delphine se trouve en surface, au-dessus de Caroline, avec la tête légèrement hors de l'eau.

Dans la séquence vidéo, la série de codas commence juste avant le premier contact entre les deux femelles et se termine peu avant les derniers contacts. Les contacts entre les femelles suivent un ordre chronologique comprenant caudale contre ventre, fentes génitales contre fentes génitales, et caudale contre caudale.

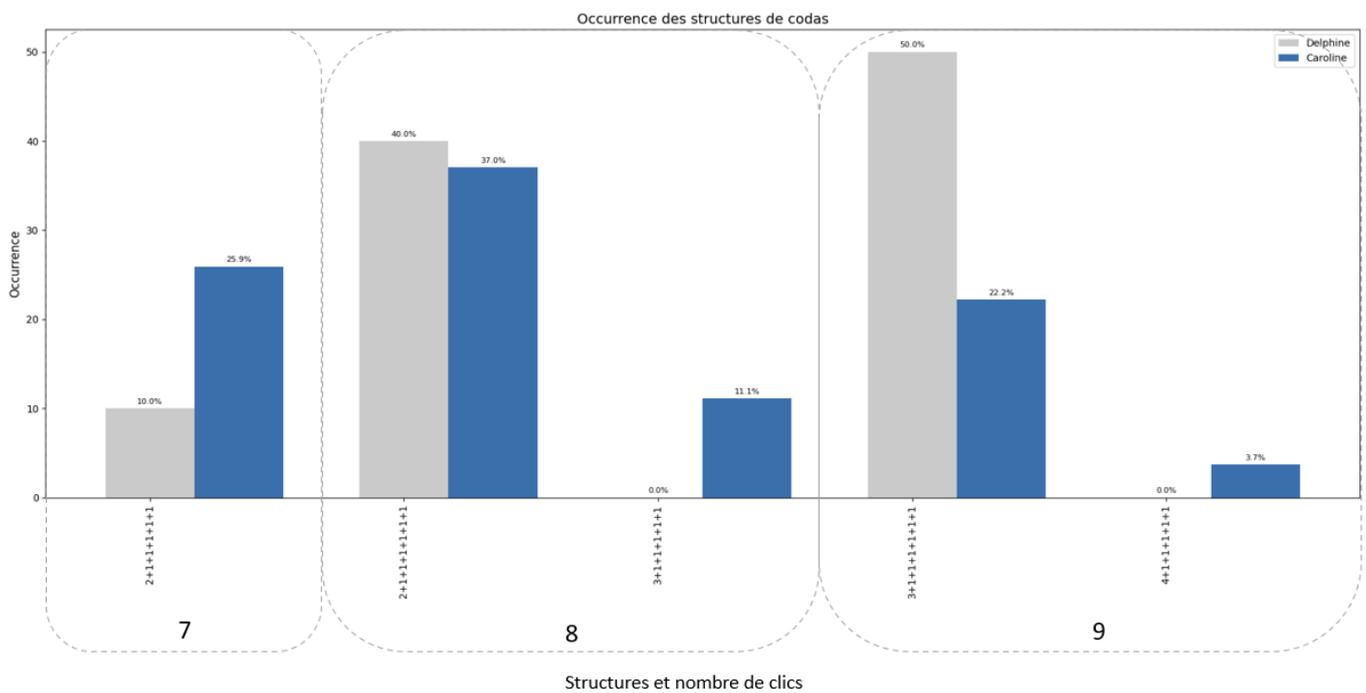
Il est notable que la structure de coda la plus fréquemment émise dans cet enregistrement est 3+1+1+1+1+1 (n=7), principalement par Caroline. Par ailleurs, le plus grand nombre de codas est enregistré lors des contacts entre fentes génitales (n=6) ou entre caudale et ventre (n=4). Dans les deux types de contact, les deux femelles émettent un nombre équivalent de codas.

### V.3. Comportements et communication

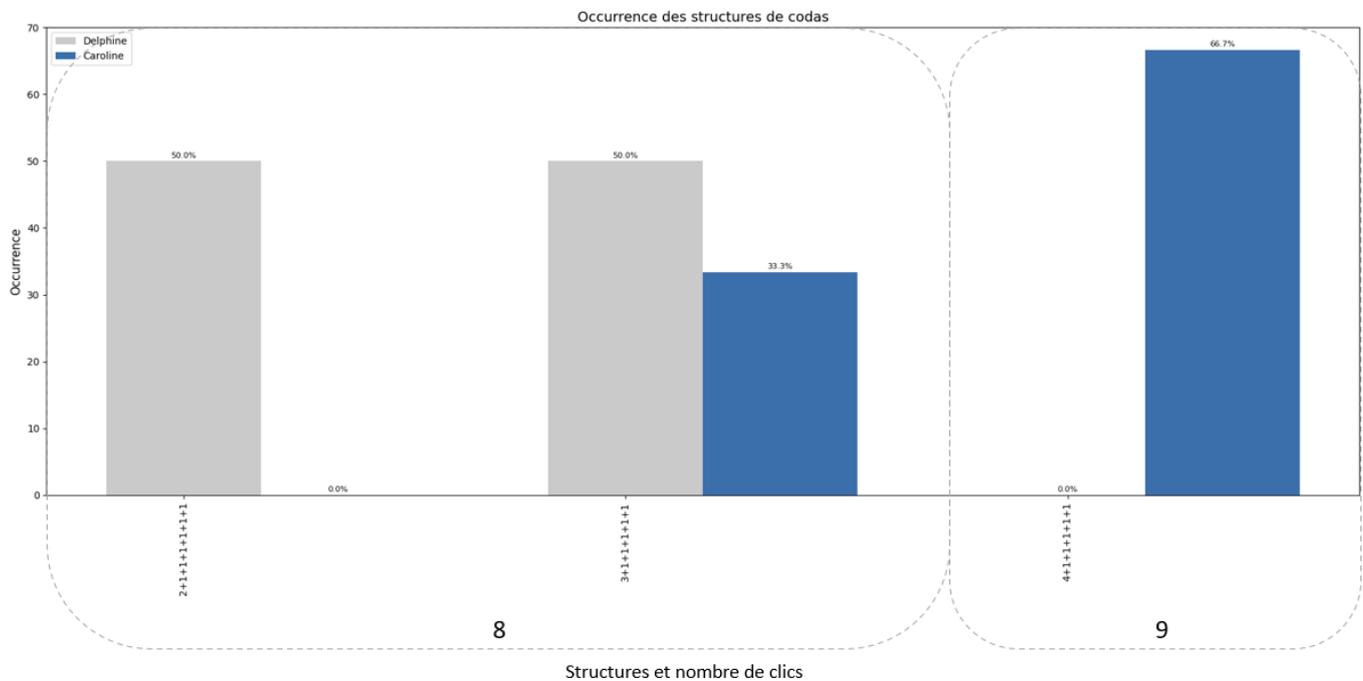
L'analyse des comportements de Caroline et Delphine révèle que parmi les 14 vidéos étudiées, une seule montre les deux femelles côte à côte, tandis que Delphine est positionnée au-dessus de Caroline dans 10 vidéos et inversement dans 3 vidéos. Il semble donc que Delphine se positionne le plus souvent au-dessus de Caroline.

De plus, lorsque Caroline est au-dessus de Delphine, les deux femelles émettent deux structures de codas distinctes. Elles émettent toutes les deux des codas de structure 3+1+1+1+1+1, mais se distinguent également par l'émission d'une seconde structure différente : la structure 2+1+1+1+1+1 pour Delphine et la structure 4+1+1+1+1+1 pour Caroline (fig. 20).

En revanche, lorsque Delphine est au-dessus de Caroline, le répertoire de codas des deux femelles est plus diversifié, avec 5 structures distinctes pour Caroline et 3 structures distinctes pour Delphine (fig. 19).



*Figure 19 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par Delphine et Caroline lorsque Delphine se situe au-dessus. En tout, 37 codas ont été enregistrées lors de ce comportement (27 de Caroline et 10 de Delphine).*



*Figure 20 : Histogramme reprenant les occurrences des structures de codas émises par Delphine et Caroline lorsque Caroline se situe au-dessus. En tout, 5 codas ont été enregistrées lors de ce comportement (3 de Caroline et 2 de Delphine).*

En général, Caroline émet systématiquement plus de codas que Delphine, indépendamment de leur position relative. De plus, Caroline semble adapter son répertoire en fonction de sa position : lorsqu'elle se trouve au-dessus de Delphine, elle privilégie les codas de la structure 4+1+1+1+1+1, tandis que lorsqu'elle est en dessous, elle préfère les codas de la structure 2+1+1+1+1+1.

De son côté, Delphine émet davantage de codas avec la structure 3+1+1+1+1+1 lorsqu'elle est au-dessus de Caroline. En revanche, lorsqu'elle est en dessous, elle émet principalement des codas de 8 clics. Il est également noté qu'aucun coda de la structure 2+1+1+1+1+1 n'a été enregistré lorsque Caroline était au-dessus de Delphine.

De même pour les comportements, le nombre de codas émises semble varier en fonction des interactions. Les deux femelles adultes émettent plus de codas lors des contacts ventre – dos. Sur l'ensemble des enregistrements vidéo analysés, 15 codas sont émises par les deux femelles lors de contacts ventre – dos, parmi lesquels 9 sont de structure 2+1+1+1+1+1.

Encore une fois, Caroline semble émettre plus de codas que Delphine.

#### V.4. Discussion

L'étude de la variabilité individuelle et comportementale, basée sur les enregistrements de la dyade Delphine-Caroline, révèle que les codas les plus fréquemment émises par ces deux femelles se concentrent sur un nombre limité de clics, principalement à 7, 8 ou 9 clics. Cette analyse montre également des variations dans la durée totale des codas et les intervalles inter-clics (ICI), tant au niveau intra-individuel qu'inter-individuel.

L'analyse des interactions entre les deux femelles, facilitée par l'identification du locuteur, a mis en lumière un schéma de dialogue distinct. Les codas varient en fonction du locuteur, de la position relative et du type de contact. Il a été noté une prépondérance des codas émises par Caroline par rapport à Delphine, ainsi qu'une tendance de Delphine à se positionner au-dessus de Caroline. Une préférence pour certaines structures de codas en fonction de la position relative des femelles pourrait suggérer une adaptation du répertoire vocal au contexte comportemental. Les émissions de codas semblent plus importantes lors de contact ventre-dos, ce qui pourrait indiquer un rôle fonctionnel des vocalises dans la communication interindividuelle. Cependant, il est possible que ces observations soient influencées par la variabilité individuelle et contextuelle.

Il est important de souligner que ces résultats préliminaires, basés sur un nombre limité de codas, ne permettent pas de formuler des conclusions définitives. Les variations observées pourraient être attribuées à des facteurs contextuels ou comportementaux non pris en compte, puisque les comportements ont été examinés uniquement à partir des enregistrements contenant des codas. Les interactions pouvant se produire sans émission de codas, ou celles pour lesquelles l'émission de codas n'est pas directement liée aux contacts observés, n'ont pas été considérées.

De plus, bien que les comportements socio-sexuels spécifiques observés entre deux femelles adultes soient souvent associés à l'émission de codas, cette interaction n'a pas été étudiée chez d'autres individus, tels que les interactions entre jeunes ou entre un adulte et un jeune. De même, ce comportement n'a pas été examiné dans le cadre de séquences sans émission de codas.

Pour approfondir cette recherche sur la variabilité individuelle des codas, il serait nécessaire d'intégrer des données comportementales afin de mieux comprendre la variabilité individuelle et contextuelle au sein de chaque unité sociale. En outre, comparer ces données avec des vidéos de contacts entre individus sans vocalises pourrait permettre d'établir un lien plus précis entre les types d'interactions et les types de codas. L'utilisation de l'antenne acoustique OPALÉ pour l'identification du locuteur via le TDOA (Time Difference of Arrival) pourrait également confirmer l'identité du locuteur (Glotin H., et al., 2024). Ainsi, une hypothèse à explorer est qu'une stratégie de communication vocalisée adaptative, en fonction du contexte social et comportemental, pourrait expliquer les différences observées.

## VI. Conclusion

Les résultats de cette étude ont révélé des différences significatives dans les répertoires de codas entre les deux unités sociales de cachalots du clan d'Irène Gueule Tordue à l'Île Maurice et ont été présentés sous forme de poster pour la conférence internationale DCLDE en juin 2024 à Rotterdam (Berkenbaum L., et al., 2024 ; Annexe III).

Plus précisément, des différences ont été observées au niveau des structures des codas émis, ainsi qu'au niveau de la richesse des répertoires. Bien que les deux unités partagent de nombreuses structures de codas, nos analyses révèlent des distinctions entre les structures les plus fréquemment émises, et une répartition plus étendue des structures de codas pour une unité.

Les données montrent que certaines structures de codas sont préférentiellement utilisées par une unité par rapport à l'autre. Par exemple, les codas de structure 2+1+1+1+1+1 (8 clics) sont dominants dans les deux unités, mais leur occurrence est plus prononcée dans l'unité de Vanessa. L'unité d'Irène se distingue par une émission très fréquente des codas de structure 3+1+1+1+1+1 (9 clics) également. De plus, les résultats statistiques confirment une divergence significative dans les types de structures de codas utilisées par les deux unités.

Les analyses de la durée totale et des ICI normalisés des codas ont mis en évidence des variabilités individuelles qui pourraient potentiellement influencer la différenciation des répertoires de codas des deux unités, en fonction de la dynamique sociale du groupe et des relations comportementales entre les individus. Les résultats de l'étude de la variabilité individuelle et comportementale d'une dyade de deux femelles adultes connues, montre qu'il semble exister des variations au sein des structures de codas similaires.

L'analyse de cette dyade révèle que les codas varient en fonction du locuteur, de leur position relative et du type de contact. Il semble donc bien qu'il existe une dynamique vocale influencée par le contexte, les individus, les comportements et les interactions sociales.

Toutefois, il est encore prématuré de confirmer ces conclusions avec précision.

Pour conclure, cette étude contribue à une meilleure compréhension de la communication des cachalots et des mécanismes sous-jacents. Elle ouvre également des perspectives pour des études futures visant à explorer d'autant plus les relations entre individus et les contextes de socialisations.

## Bibliographie

- Abeille Régis, Doh Yann, Giraudet Pascale, Glotin Hervé, Prevot Jean-Marc & Céline Rabouy. (2014). Estimation robuste par acoustique passive de l'Intervalle-Inter-Pulse des clics de *Physeter macrocephalus* : méthode et application sur le Parc national de Port-Cros. *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park*, 28: 23-35
- Adam Olivier, Yernaux Adrien, Sauvêtre Marie, Ngosso Macky Justine, Nuel Gregory, Haffner-Trinh Marie, Troussier Robien, Guillermin Zohria-Lys, Picon Léa, Barluet de Beauchesne Lucie, Kuhn Victoire, Delfour Fabienne, Sarano Véronique, Vitry Hugues, Preud'homme Axel, Heuzy René, Jung Jean-Luc, Girardet Justine, Glotin Hervé & Sarano François. (Dec 2020). Study of behaviours and emitted codas during sperm whales social interactions. *e-Forum Acusticum 2020*. Lyon, France. pp.3225-3227, 10.48465/fa.2020.1088. hal-03230838.
- Amorim Thiago Orion Simoes, Rendell Luke, Di Tullio Juliana, Secchi Eduardo R., Castro Franciele R. & Andriolo Artur. (2020). Coda repertoire and vocal clans of sperm whales in the western Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 160, 103254.
- Berkenbaum Lara, Giraudet Pascale, Sarano François, Sarano Véronique, Viethen Salomé, Adam Olivier, Heuzy René, Preud'homme Axel & Glotin Hervé. (Juin 2024). Exploring coda repertoires in two recently separated sperm whale social units off Mauritius. Poster pour DCLDE 2024 Rotterdam.
- Berkenbaum Lara. (2021). Etude étho-acoustique d'un groupe social de cachalots (*Physeter macrocephalus*) résident de l'Île Maurice (Océan Indien). Mémoire de fin d'étude. Université de Liège.
- Brun Claire & Exbrayat Jean-Marie. (2023). Le chant dans la communication animale. *Revue CONFLUENCE : Sciences et Humanités 2023/2 (N°4)*, Pages 21 à 39.
- Christal Jenny & Whitehead Hal (2001). Social affiliations within sperm whale (*Physeter macrocephalus*) groups. *Ethology*, 107(4), pp. 323–340.
- Coch José, Berkenbaum Lara & Adam Olivier. (2023). Une contribution du Text-mining à la connaissance du langage des cachalots. *ResearchGate*.
- Drouot Violaine, Good C. John & Gannier Alexandre. (2004). Regional diversity in the social vocalizations of sperm whale in the Mediterranean Sea. *Revue d'Ecologie (La Terre et La Vie)*, tome 59, n°4. Pp. 545-558.
- Ferrari Maxence, Trinh Marie, Sarano François, Sarano Véronique, Giraudet Pascale & Glotin Hervé (2023). Age and interpulse interval relation from newborn to adult sperm whale (*Physeter macrocephalus*) off Mauritius. Article soumis pour publication à Scientific report
- Frantzis Alexandros & Alexiadou Paraskevi. (2008). Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) coda production and coda-type usage depend on the presence of conspecifics and the behavioural context. *Canadian Journal of Zoology*, 86: 62-75.
- Gero Shane, Whitehead Hal & Rendell Luke. (2016). Individual, unit and vocal clan level identity cues in sperm whale codas. *R. Soc. open sci.*3: 150372.
- Girardet Justine, Sarano François, Richard Gaëtan, Tixier Paul, Guinet Christophe, Alexander Alana, Sarano Véronique, Vitry Hugues, Preud'homme Axel, Heuzy René, Garcia-Ceguarra Ana M., Adam Olivier, Madon Bénédicte & Jung Jean-Luc. (2022). Long Distance Runners in the Marine Realm : New Insights Into Genetic Diversity, Kin relationships and Social Fidelity of Indian Ocean Male Sperm Whales. *Front. Mar. Sci.* 9:8156841.

- Giraudet Pascale. (2024). Etude et traitement du signal acoustique émis par les cétacés. Cours de Master.
- Glotin Hervé, Deloustal Nicolas, Paiement Adeline, Paris Sébastien, Gies Valentin, Barchasz Valentin, Jean-Charles Vinaj & Sarano François. (Juin 2024). Ethoacoustics of Free Ranging Cetaceans by High Resolution Portable Array: from P.m. to G.m. multipulsed clicks ? DCLDE. Rotterdam, Pays-Bas.
- Goddard Nicolas. (2015). Données récentes sur le comportement du grand cachalot (*Physeter macrocephalus*). Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 101 p.
- Hersh Taylor A., Gero Shane, Rendell Luke et al. (2022). Evidence from sperm whale clans of symbolic marking in non-human cultures. PNAS, Population biology, Vol. 119, No. 37.
- Huijser Léonie A. E., Estrade Vanessa, Webster Imogen, Mouysset Laurent, Cadinouche Adèle, Dulau-Drouot Violaine. Vocal repertoires and insights into social structure of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in Mauritius, southwestern Indian Ocean. *Mar Mam Sci.* 2020;36:638–657.
- Longitude 181. (2015). Individual identification card Sperm whales of Mauritius I. Longitude 181 (Communication personnelle).
- Marcoux Marianne, Whitehead Hal & Rendell Luke. (2006). Coda vocalizations recoded in breeding areas are almost entirely produced by mature female sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Canadian Journal of Zoology*, 84(4), 609-614.
- Patris Julie. (2021). A l'écoute des cétacés. (s.d.) Encyclopédie de l'environnement.
- Rendell Luke & Frantzis Alexandros (2016). Chapter Two - Mediterranean Sperm Whales, *Physeter macrocephalus*: The Precarious State of a Lost Tribe. *Advances in Marine Biology*, 75: 37-74.
- Rendell Luke & Whitehead Hal. (2004). Do sperm whales share coda vocalizations ? Insights into coda usage from acoustic size measurement. *Animal Behaviour*, 67(5), 865-874.
- Sarano François et al. (2023). La Voix des Cachalots, programme recherche, Longitude 181, Communication personnelle.
- Sarano François, Girardet Justine, Sarano Véronique, Vitry Hugues, Preud'homme Axel, Heuzey René, Garcia-Cegarra Ana M., Madon Bénédicte, Delfour Fabienne, Glotin Hervé, Adam Olivier & Jung Jean-Luc. (2021). Kin relationships in cultural species of the marine realm : case study of matrilineal social group of sperm whales ff Mauritius island, Indian Ocean. *R. Soc. Open Sci.* 8:201794.
- Sarano François, Sarano Véronique, Adam Olivier, Girardet Justine, Vitry Hugues, Preud'homme Axel, Heuzey René, Glotin Hervé, Jung Jean-Luc, Delfour Fabienne (2019). A focal animal 6-points Likert scale to intra-units interactions in sperm whales [Conférence]. *World Marine Mammal*, Barcelona.
- Sarano François. (2017). Le retour de Moby Dick, ou ce que les cachalots nous enseignent sur les océans et les hommes. Collection Mondes Sauvages, Ed Actes Sud.
- Sarano Véronique, Sarano François, Girardet Justine, Preud'homme Axel, Vitry Hugues, Heuzey René, Sarano Marion, Delfour Fabienne, Glotin Hervé, Adam Olivier, Madon Bénédicte & Jung Jean-Luc (2022) : Underwater photo-identification of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) off Maritius, *Marine Biology Research*, <https://doi.org/10.1080/17451000.2022.2040737>

Sharma Pratyusha, Gero Shane, Payne Roger, Grubber David F., Rus Daniela, Torralba Antonio & Andreas Jacob. (2024). Contextual and combinatorial structure in sperm whale vocalisations. *Nature Communications*, 15(1).

W. John Richardson, Charles R. Greene Jr., Charles I. Malme, & Denis H. Thomson. (1995). *Marine Mammals and Noise*. (s.d.). ScienceDirect

Watkins William A. (1977). Sperm whales codas. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 62(6), 1485-1490.

Weilgard Linda & Whitehead Hal. (1993). Coda communication by sperm whales (*Physeter macrocephalus*) off the Galapagos Islands. *Can. J. Zool.* 71: 744-752

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

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

Whitehead Hal, Antunes Ricardo, Gero Shane, Wong N.P. Sarah, Engelhaupt Daniel & Rendell Luke. (2012). Multilevel Societies of Female Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*) in the Atlantic and Pacific: Why Are They So Different? *International Journal Of Primatology*, 33(5), 142-1164.

## Annexes

### I. Tests statistiques sur les deux unités sociales

*Tableau 1 : Résultats des tests statistiques sur le nombre de clics par codas entre les deux unités sociales étudiées*

Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de normalité	Test de Shapiro	
p-value	0,02383	0,0002171
Test statistique de comparaison	Test de Mann-Whitney-Wilcoxon	
p-value	0,4953	

*Tableau 2 : Résultats des tests statistiques sur les structures des codas entre les deux unités sociales étudiées (**gras** : différence significative)*

Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de comparaison	Test du Chi <sup>2</sup>	
p-value	<b>8,817.10<sup>-12</sup></b>	

*Tableau 3 : Résultats des tests statistiques sur la durée totale des codas de structure 2+1+1+1+1+1+1 (8 clics) entre les deux unités sociales étudiées*

Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de normalité	Test de Shapiro	
p-value	2,053e-07	0,004265
Test statistique de comparaison	Test de Mann-Whitney-Wilcoxon	
p-value	0,1086	

*Tableau 4 : Résultats des tests statistiques sur la durée totale des codas de structure 3+1+1+1+1+1+1 (9 clics) entre les deux unités sociales étudiées*

Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de normalité	Test de Shapiro	
p-value	0,8945	0,01109
Test statistique de comparaison	T Test de Student	
p-value	0,9356	

*Tableau 5 : Résultats des tests statistiques sur les ICI normalisés des codas de structure 2+1+1+1+1+1+1 (8 clics) entre les deux unités sociales étudiées*

Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de normalité	Test de Shapiro	
p-value	0.2815	0.2373
Test statistique de comparaison	T Test de Welch	
p-value	0.5974	

*Tableau 6 : Résultats des tests statistiques sur les ICI normalisés des codas de structure 3+1+1+1+1+1+1 (9 clics) entre les deux unités sociales étudiées*

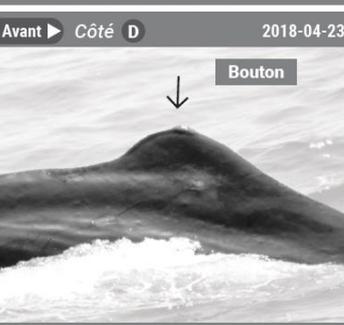
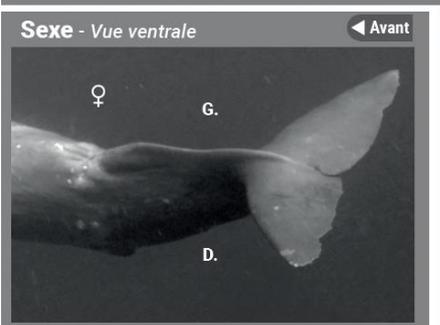
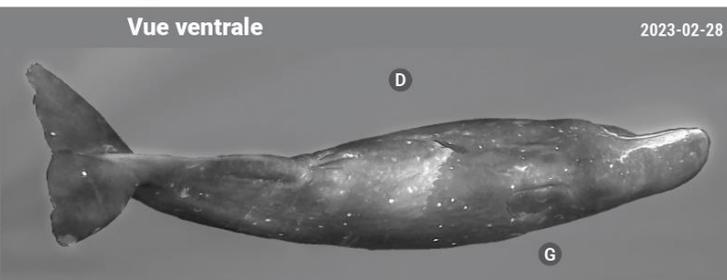
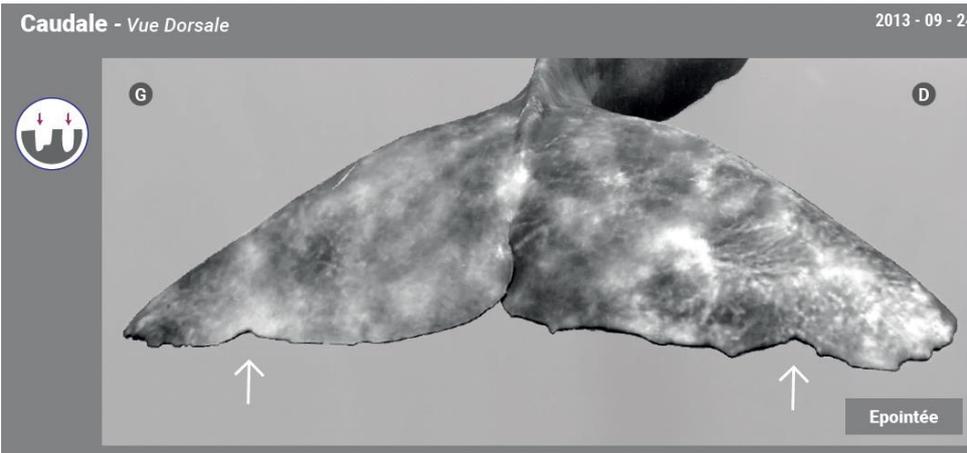
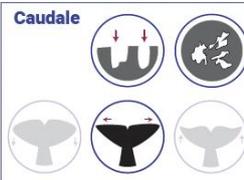
Unités sociales	Irène	Vanessa
Test statistique de normalité	Test de Shapiro	
p-value	0.2806	0.2398
Test statistique de comparaison	T Test de Welch	
p-value	0.5974	

II. Fiches d'identification des femelles adultes Delphine et Caroline de 2023

**CAROLINE** 1<sup>ÈRE</sup> OBS. : 2012 - 10 - 06 // DERNIÈRE OBS. : 2023 - 06 - 14

**IRÈNE'S CLAN**  
Vanessa's sub group

ADULTE	VUE	
ADN	- 2012 2013 - ? 2015 - 2016 2017 - 2018 2019 - 2020 ? - 2022 2023	Globice : 2011 - 07 - 02 : BOUTON
♀		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vue ventrale piquetée de blanc ("ciel étoilé")</li> <li>• Mère de Zoé</li> <li>• Mère de Alexander ?</li> </ul>



© Longitude 181 - Creation 2015 / Update 2023 - Concept : V. et F. Sarano - Graphic design & illustrations : M. Sarano - Pictures : S. Granzotto, F. Guérin, R. Heuzey, A. Preud'homme, V. & F. Sarano.

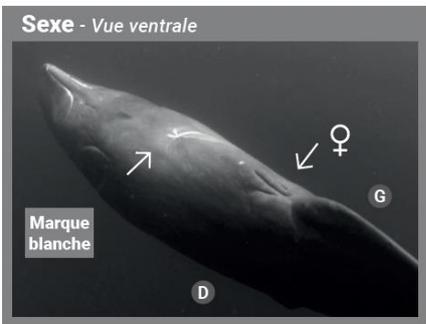
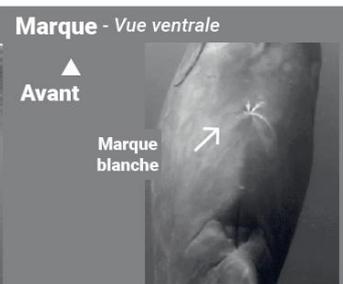
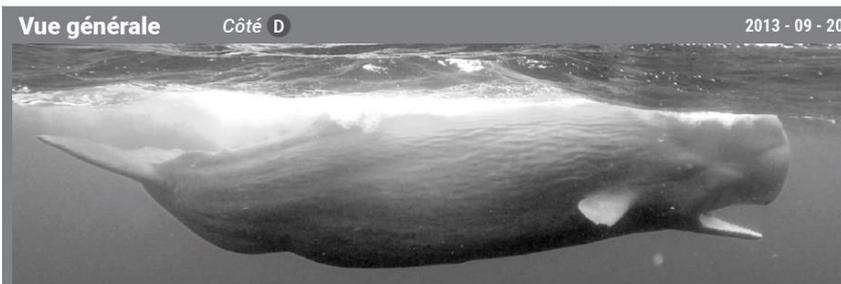
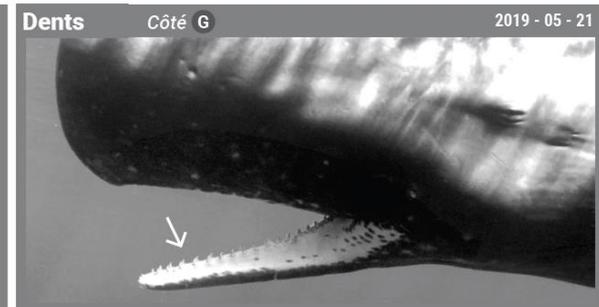
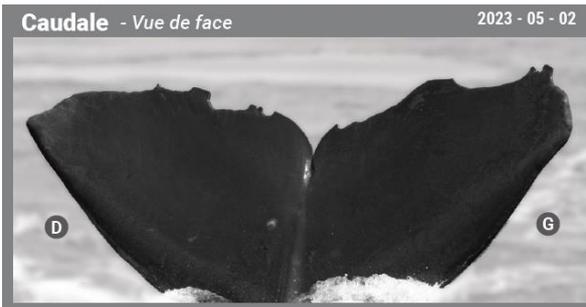
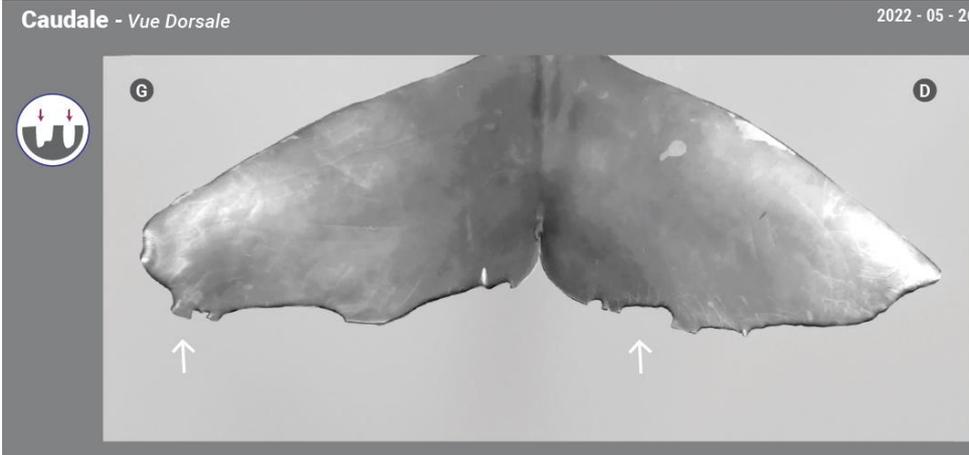
Dernière correction : 2024 - 03 - 15

Figure 1 : Fiche d'identification des cachalots de l'Île Maurice de 2023 – Caroline (Longitude 181)

**DELPHINE** 1<sup>ÈRE</sup> OBS. : 2011 - 05 - 16 // DERNIÈRE OBS. : 2023 - 06 - 14

**IRÈNE'S CLAN**  
Vanessa's sub group

ADULTE	VUE	Globice : 2009 - 10 - 19 : CARAMBOLE
ADN	2011 - 2012 2013 - 2014 2015 - 2016 2017 - 2018 2019 - 2020 ? - 2022 2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lèvres très sombres, sans marque blanche.</li> <li>• 3 marques blanches en étoile près du nombril</li> <li>• Enceinte de Tache Blanche : 20 mai 2011</li> <li>• Enceinte de Chesna : 14 février 2018</li> </ul>
♀		



© Longitude 181 - Creation 2015 / Update 2023 - Concept : V. et F. Sarano - Graphic design & illustrations : M. Sarano - © Pictures : S. Granzotto, F. Guérin, R. Heuzey, A. Preud'homme, V. & F. Sarano.

Dernière correction : 2024 - 03 - 15

Figure 2 : Fiche d'identification des cachalots de l'Île Maurice de 2023 – Delphine (Longitude 181)

### III. Contribution à la réalisation d'un poster

Au cours de mon stage, j'ai également eu l'opportunité de contribuer à la réalisation d'un poster présenter par Lara Berkenbaum lors de la conférence DCLDE (Detection, Classification, Localisation and Density Estimation) en juin 2024 à Rotterdam, aux Pays-Bas (fig. 3).



## Exploring coda repertoires in two recently separated sperm whale social units off Mauritius

L. Berkenbaum<sup>a,f</sup>, P. Giraudet<sup>a,b,f</sup>, F. Sarano<sup>b,f</sup>, V. Sarano<sup>b,f</sup>, S. Viethen<sup>a,f</sup>, O. Adam<sup>c,d,f</sup>, R. Heuzey<sup>a,f</sup>, A. Preud'homme<sup>a,f</sup>, H. Giotin<sup>a,b,f</sup>

a) Univ. de Toulon, Aix Marseille Univ, CNRS, LIS, DYNI team, Marseille, France b) Longitude 181, Valencia, France https://www.longitude181.org c) Sorbonne Univ, CNRS, Inst. d'Alembert, Paris, France d) Univ. Paris-Saclay, CNRS, Inst. des Neurosciences Paris-Saclay, GSI/Velvet, France e) Indian Ocean Marine Life Foundation, Mauritius f) CIAN, Centre interne d'Intelligence Artificielle en Acoustique Naturelle, Toulon, France.

lara.berkenbaum@lis-lab.fr, giotin@univ-tln.fr, giraudet@univ-tln.fr, olivier.adam@sorbonne-universite.fr, saranofrancois@gmail.com

### Introduction

**Coda**  
Series of clicks produced by sperm whales with stereotyped timings specific to a vocal clan, related to communication and social bonds<sup>[1]</sup>.

**Context**

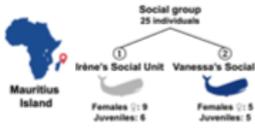
- Since 2008, 8-click codas are most recorded off Mauritius<sup>[2]</sup>.
- The Irène Gueule Tordeue (IGT) sperm whale social group, studied from 2013, most frequently emits codas of the "2+1+1+1+1+1" type<sup>[3, 4, 5, 6]</sup>.
- As of 2017, the IGT group splits into 2 subgroups: Irène's and Vanessa's social units.

**Objectives**

- Compare the repertoire of codas recorded in 2023 within the two social units.
- Compare coda duration and inter-click intervals in the "2+1+1+1+1+1" coda.




### Materials and Methods



- Period: March to June 2023 (20 days).
- 45 audio recordings totalling 1h14min38s.
- 438 codas registered; **351 codas analysed**.
- 19.9% excluded due to detection errors and overlapping codas.

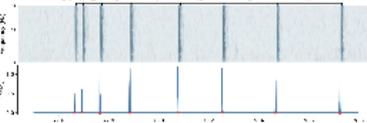


Fig.1: Example of a coda "2+1+1+1+1+1": frequency and energy with click detection (red stars: clicks detected).

- Opportunistic passive underwater observations conducted by Longitude 181<sup>[4]</sup>.
- Collection of high-definition acoustic data sets using OPALÉ acoustic array<sup>[7]</sup>.
- Manual coda annotation and automatic energy-based click detection (fig. 1).
- Statistical tests to compare the two social units: Shapiro-Wilk (normality), Mann-Whitney-Wilcoxon and Welch's t-test. **Significant if p-value < 0.05.**

### Preliminary Results

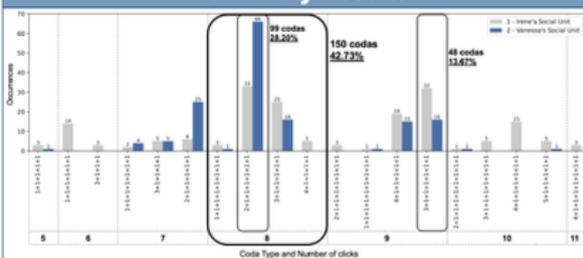


Fig. 2: Histogram representing similarities and differences in the coda repertoire of Irène's (n = 196 codas) and Vanessa's (n = 155 codas) social units by coda type, number of clicks and occurrences. Codas with occurrence < 2 in the dataset were excluded (n = 16).

Coda Type	Irène's Social Unit (n=196)	Vanessa's Social Unit (n=155)
8-click	28.25%	42.73%
9-click	13.82%	13.82%

**Coda Types**

- Identified codas: 35 types, 5 to 14 clicks.
- In common: 12 types.

**Repertoires comparison**

- Coda types: significant difference.
- Number of clicks per coda: no significant difference.

① Irène's Social Unit	② Vanessa's Social Unit
• Total Coda Types: 32.	• Total Coda Types: 15.
• Most frequent codas and types: 8-click (n=66) and 9-click codas (n=56) 2+1+1+1+1+1 and 3+1+1+1+1+1+1.	• Most frequent codas and types: 8-click (n=84) and 9-click codas (n=32) 2+1+1+1+1+1+1 and 2+1+1+1+1+1.

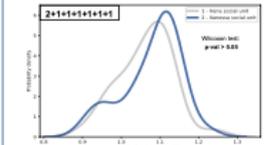


Fig. 3: Kernel Density Estimate plot to visualise the distribution of codas by their total duration.

- Duration: 0.89 to 1.24 s.
- No significant difference, unimodal distribution.

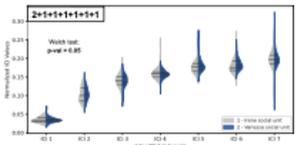


Fig. 4: Violin plot comparing the distribution of normalized intervals between clicks in social units.

- ICI coda normalized by total duration
- No significant difference.

### Discussion

- Greater diversity of coda types in Irène's social unit: Richer communication? Composition of social unit? Irène social unit with more adult females and two newborns.
- Distinct coda types: communication divergences in social units?

**Potential bias:**

- More codas in Irène's social unit.
- Analysis period limited to 2023.
- Individual variability and behavioral context not yet explored.

### Conclusion and Perspectives

**Further research: confirm hypotheses and explore underlying causes of similarities and differences, to better understand the social dynamics and communication strategies of sperm whales.**

- Compare coda repertoires before, during, after the split of IGT social group.
- Integrate behavioral data.
- Identify individual variability using age, sex, family link<sup>[3,4,5]</sup>, inter-pulse intervals and speaker identification with OPALÉ<sup>[7]</sup>.

**Classify all codas, compare the underlying combinatorial structures<sup>[8]</sup> (such as coda duration and normalized ICIs) and correlate them with behaviors to identify patterns and analyze vocal "conversations" (fig. 5).**

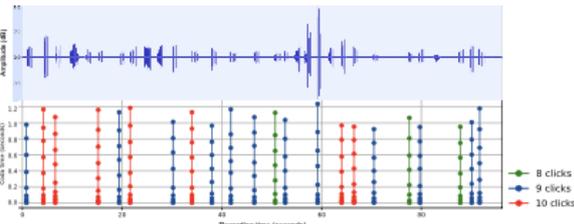


Fig. 5: Spectrogram and representation of codas in a "conversation" with multiple individuals in Irène's social unit. Duration: 1min 36s; Number of codas: 22; Vertical lines = one coda; Dots = clicks.

### Acknowledgments

We thank Longitude 181 and Label Bleu productions. This study was conducted under the official authorization of the Mauritius Authority. We thank Stéphane Y. Gies and V. Barthez for their help in the OPALÉ recorder, fieldwork, video recording, and data analysis were granted by the NGOs, Longitude 181 and "Un Océan de Vie". Mauritian public authorities greatly helped the project "La Voix des cachalots", in particular the Mauritian Prime Minister's Office, the Marine Continental Shelf Exploration and Administration (MCSEA, Dr. Riza Badal and his team), the AFRC (Chief Scientific Officer Mr. Sarah Kodum), the MFCO (Mr. Staline Jostin and Miss Eliane Timon), and the Tourism Authority (Dr. Miss Khoushik Boodoo, Director). We thank Navin Boodhoo for his valuable participation in the fieldwork. H.G. received the ANR AID grants AI Chair in bioacoustics ANR-20-CHIA-0014 and ULPCochies ANR-21-CE44-0020, for hardware and analysis, localisation of cetacean communication.

### References

[1] Weigt, L., and Whitehead, H., 1993. Coda communication by sperm whales off the Galapagos Islands. *Can. J. Zool.* 71.  
[2] Huijter, L. A. E. and al., 2019. Vocal repertoires and insights into social structure of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in Mauritius, southwestern Indian Ocean. *Marine Mammal Science*, 35(2), pp. 638–657.  
[3] Oranek, J. and al., 2022. New insights into Genetic Diversity, Kin Relationships and Social Fidelity of Indian Ocean Male Sperm Whales.  
[4] Sarano, V. and al., 2022. Underwater photo-identification of sperm whales off Mauritius. *Marine Biology Research*.  
[5] Sarano, F. and al., 2023. La Voix des Cachalots, programme recherche Longitude181.  
[6] Berkenbaum, L., 2024. Étude étho-acoustique d'un groupe social de cachalots résident de l'île Maurice (Cetacei Indiferi) University of Liege.  
[7] Giotin, H., and al., DCLDE 2024. OPALÉ: a super-resolution autonomous mobile sensor for cetacean ethoacoustical researches.  
[8] Sharma, P. and al., 2024. Contextual and Combinatorial Structure in Sperm Whale Vocalisations. *Nat Commun* 15, 3617.

Figure 3 : Poster DCLDE juin 2024, Rotterdam (Berkenbaum L., et al. 2024)

## Abstract

Social communication in sperm whales (*Physeter macrocephalus*) is based on the emission of short, repeated and stereotyped sequences of clicks called codas (Adam O., et al., 2020; Marcoux M., et al., 2006; Rendell L., et al. 2004). These codas are mainly emitted by adult females during social interactions, and are passed on by learning to younger females (Adam O., et al., 2020; Marcoux M., et al., 2006; Frantzis A., et al., 2008).

Irène Gueule Tordue's clan, living off the coast of Mauritius, has shown a progressive separation since 2017, noticed by observers, prompting the hypothesis of a differentiation in their vocal communication. To explore this question, the coda repertoires of the two social units from the social group of 25 individuals were studied for the year 2023, revealing significant differences in the coda structures used. In addition, a first exploration of individual and behavioral variability was carried out on a dyad of two known adult females from Vanessa's social unit.

Bioacoustic analysis of the audio recordings identified and analyzed 397 codas, revealing a difference in the coda structures emitted between the two social units. The two social units share many coda structures, and the characteristic 2+1+1+1+1+1 structure is found (Berkenbaum L., 2021; Coch J., et al., 2023). However, this structure was found to be much more frequently emitted by Vanessa's unit (n=85). In addition, Irène's unit also emitted codas of the 3+1+1+1+1+1 structure very frequently (n=35).

Analysis of the total durations of codas and standardized ICIs revealed no differences between the two social units.

The estimation of coda speakers using the IPI calculation (Ferrari et al., 2023) made it possible to study the intra-individual and inter-individual variability of two adult females in regular dyadic interaction. The results showed that individual coda repertoires appear to be more restricted than the repertoires of social units. In addition, individuals seem to preferentially emit certain coda structures depending on the social context, and certain social contexts or contacts seem to stimulate coda production.

These results therefore confirm a functional role for vocalisations in inter-individual communication and suggest the existence of an adaptive vocalised communication strategy linked to the social and behavioural context, which could explain the differences observed.

However, due to the limited size of the database, definitive conclusions on the separation of the two social units, or on individual and behavioral variability, remain difficult to draw. Further studies, incorporating other variables such as family ties, are needed to try and demonstrate vocal differentiation within the two social units. These studies could provide a better understanding of communication processes in this sperm whale clan, and further explore the notion of variability in relation to social context and individuals.