

2

Trajectographie 3D d'une pluralité de cachalots

Le grand cachalot, *Physeter macrocephalus*, *Pm* est un cétacé à dents (Odontoceti) de la famille des physétéridés. Sa répartition est cosmopolite, dans la mesure où on en retrouve dans tous les océans et presque toutes les mers du globe, dont en Méditerranée. Il se nourrit principalement de poissons et de calmars (en proportions variables), qu'il chasse en plongeant à des profondeurs pouvant atteindre plus d'un kilomètre. A une telle profondeur, la lumière est totalement absente. *Pm* se repère et chasse donc par écho-localisation : il émet des signaux sonores, les clics, qui vont être réfléchis par l'environnement et les proies, et recaptés au niveau de son sonar.

Ce super-prédateur, le plus grand de la planète, est une espèce menacée par l'activité de l'Homme : la chasse à la baleine, la pêche, la pollution sonore et chimique sous marine, les collisions avec des bâtiments ainsi que le réchauffement climatique ont provoqué une diminution importante des populations. C'est dans ce contexte que la surveillance en continu et en temps réel des *Pm* est de mise.

La mission Sphyrna a contribué à mettre en place une nouvelle technique de pistage précise en 3 dimensions et en continu. Ce système se base sur l'écoute des clics émis par les cachalots grâce à plusieurs hydrophones. Ces clics peuvent atteindre des valeurs de 130 dB, et ils sont enregistrés à une fréquence de 384 kHz. Ces enregistrements, après traitement (détection par méthode d'IA, calcul des temps de retard à l'arrivée (TDoA)) ont permis de calculer les coordonnées cartésiennes 3D des positions au cours du temps d'un groupe de *Pm*. Grâce à ces coordonnées, il nous a été possible de calculer différents paramètres (vitesses, tortuosité ...) issus du trajets des *Pm*, et ce pour les différents individus identifiés.

Les dynamiques de groupe et de chasse des *Pm* sont à ce jour méconnues. Les données obtenues par la mission Sphyrna, de part leur grande précision et les conditions exceptionnelles de traque (absence de bruit), nous permettent donc une analyse de ces comportements. Nous nous sommes ainsi demandé quel était le nombre de proies capturées par plongée, l'efficacité de l'orientation des *Pm* par écholocalisation, leur mode d'attaque (direction privilégiée sous la proie ? au dessus de la proie ?). Nous avons également regardé la répartition des aires de chasses des différents individus et en fonction de la répartition en proies afin de mettre en évidence un patron ou une dynamique de chasse à l'échelle du groupe.

Afin de répondre à ces différentes questions, nous avons étudié le lien entre la vitesse moyenne des *Pm*, leur profondeur de nage, les intervalles inter-clics, ainsi que leur vitesse ascensionnelle. Nous avons également analysé le temps passé à chaque profondeur, afin de souligner et mettre en évidence les profondeurs de chasse privilégiées. Enfin, nous avons réalisé le calcul de la tortuosité du trajet des *Pm*. Ces mesures nous ont permis d'individualiser les différentes phases de chasse au cours de la plongée, et d'étudier les corrélations entre l'intervalle inter-clic, la profondeur, les différentes vitesses et la tortuosité elle-même, au cours de ces phases.

2.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données ont été acquises grâce à 5 hydrophones montés sur l'ASV "Sphyrna", un véhicule autonome de 17m de long. Quatre d'entre eux ont été montés sous la quille, à une profondeur de deux mètres et avec un espacement de 35 à 70 cm. Le dernier hydrophone a été placé sous la poupe, à une profondeur de 0,2m et à une distance de 7m de la quille.

Les enregistrements ont été effectués à l'aide des enregistreurs Qualilife HighBlue fournis par la plateforme technologique SMIoT l'Université de Toulon <http://www.smiot.fr>. La résolution des enregistreurs est de 24 bits par channel avec une fréquence d'échantillonnage de 256 kHz sur chacun des 5 canaux. Le niveau de bruit de ces enregistreurs est également de grande qualité, malgré leur fréquence d'acquisition importante. Ces enregistreurs permettent en outre une synchronisation des mesures effectuées à l'échantillon près, soit une résolution temporelle $T_{ech} \simeq 4\mu s$ correspondant à une distance de propagation du son dans l'eau de $4mm$. L'erreur de mesure temporelle est donc extrêmement faible, ce qui est un facteur essentiel pour obtenir des résultats précis et fiables pour la reconstruction ultérieure de trajectoire. De plus ces enregistreurs disposent d'une entrée de synchronisation externe, sur laquelle vient se brancher la pin PPS (Pulse per Second) d'un récepteur GPS. Ce signal, d'une précision de l'ordre de $50ns$ et donc inférieure à la résolution temporelle des enregistreurs, permet une synchronisation extrêmement précise de plusieurs enregistreurs fonctionnant en simultané et placés en des lieux différents. Cette synchronisation ouvre des perspectives importantes pour la construction d'antennes acoustiques de grande taille permettant un suivi d'individus ou de groupes sur des très longues distances (plusieurs dizaines de kilomètres si les lieux parcourus sont équipés). Cet équipement a été pour la première fois testé au cours de la cette mission avec succès.

Les données ont été acquises le 14 janvier 2020 au Sud de Monaco.

FIGURE POSITION RECORD

2.2 DÉTECTION

L'antenne décrite dans le chapitre dédié aux instruments est composée de 4 hydrophones. Grâce à eux, nous pouvons écouter les émissions sonores des animaux observés. Mais c'est leur placement judicieux, millimétré, qui nous permet de mesurer précisément pour chaque détection, les écarts temporels entre le signal de chacun des canaux d'enregistrement. Ces intervalles sont appelés TDOAs pour "Time Difference Of Arrival" et sont la base de notre processus de Trajectographie 3D par Ethoacoustique.

2.2.1 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

La figure ci-dessous illustre le spectrogramme d'un clic de cachalot, enregistré par les 4 hydrophones. On peut noter les décalages temporels entre les signaux de chacune des voies.

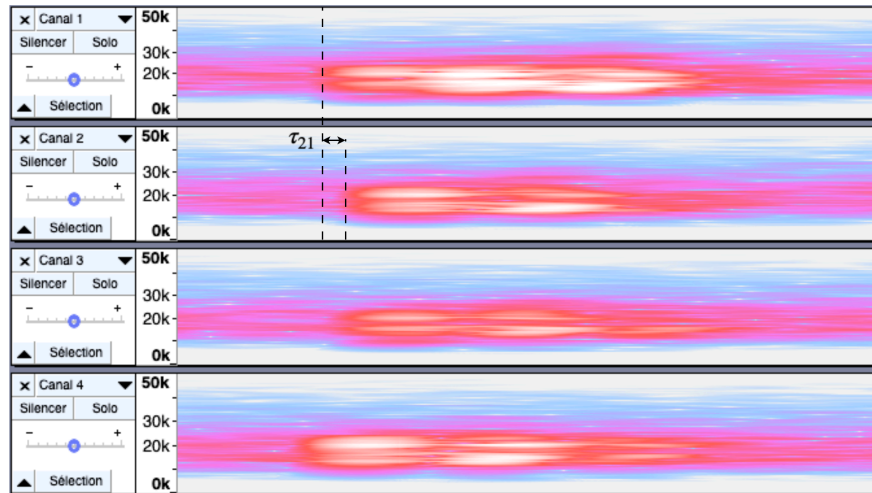


Figure 2.1: Visualisation du spectrogramme d'un clic détecté par les 4 hydrophones

Plus particulièrement, le TDOA_{21} se mesure : $\tau_{21} = t_1 - t_2$

Nous rappelons ci-dessous le principe de base associé au TDOA dans le cas d'une antenne composée de 2 hydrophones, et son utilisation pour les calculs dans l'espace (2D ou 3D).

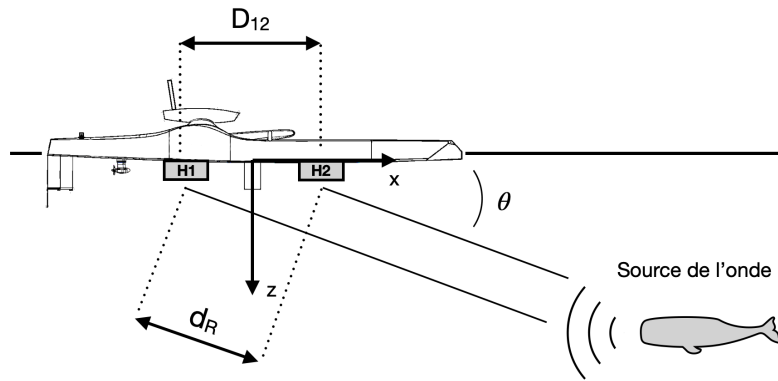


Figure 2.2: Principe du TDOA pour une antenne de 2 hydrophones

Nous pouvons calculer $\theta = \cos^{-1} \left(\frac{d_r}{D_{12}} \right)$

Avec :

- D_{12} : distance entre les hydrophones 1 et 2
- t_1, t_2 : dates de réception du clic pour les hydrophones 1 et 2.
- $d_r = v \cdot \tau_{12}$: distance dû au retard de réception de l'onde par l'hydrophone 1 par rapport à l'hydrophone 2

Ce principe de base est bien entendu adapté dans le cas d'une antenne à 4 hydrophones ce qui nous permet de calculer deux angles au lieu d'un, nous donnant ainsi la direction vers la source en 3D.

2.2.2 SOLVEUR LINÉAIRE

Nous pouvons ensuite résoudre un système d'équations en considérant la vitesse de déplacement d'une onde sonore dans l'eau, la fréquence d'échantillonnage réelle de nos enregistrements, ainsi que les positions précises de nos hydrophones. Ce premier solveur, dit linéaire, nous permet d'obtenir précisément la direction vers la source du son enregistré. Cette direction est donnée sous la forme de 2 angles : l'Azimut (le cap), et l'élévation (une élévation de 0° correspond à peu près à la surface de l'eau).

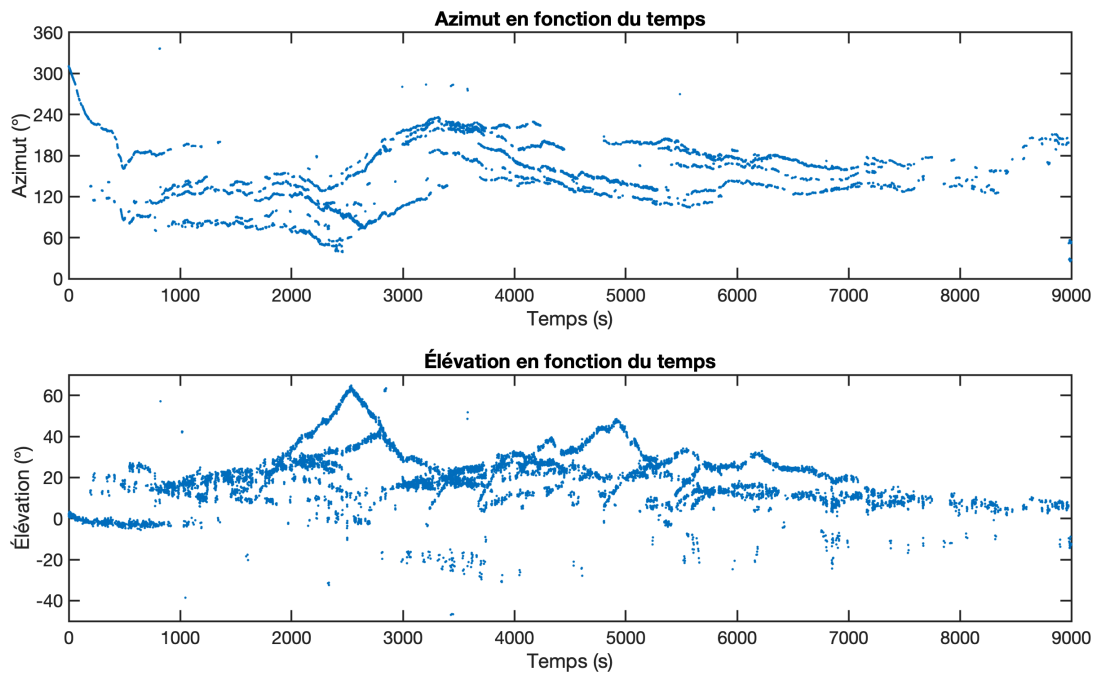


Figure 2.3: AZ(t) & EL(t) donnent la direction vers les sources des clics

2.3 PISTAGE

La figure précédente nous montre à quel point les détections peuvent donner lieu à des estimations précises des directions vers les sources. Il faut cependant garder à l'esprit que tous les animaux (les pistes) enregistrés sont représentés ici sans distinction. Or, pour avancer dans notre processus, il est nécessaire de procéder à une séparation de ces pistes, afin de regrouper les détections par animal. Pour cela, nous nous basons sur le groupement (clustering) DBSCAN¹¹ pré-établi grâce aux TDOAs. Ce clustering effectue un premier groupement (en moyenne quelques dizaines de clics par groupe) d'une manière automatique. La probabilité pour que les clics de chacun de ces petits groupes proviennent d'une même piste est très élevée.

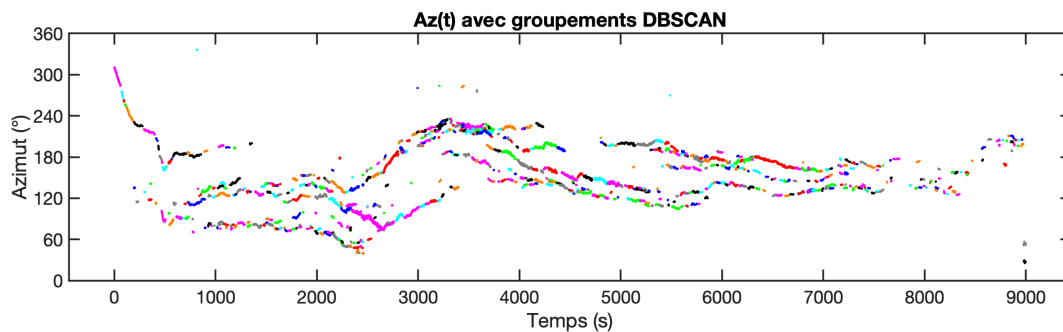


Figure 2.4: Groupements DBSCAN visualisés ici pour la trace AZ(t)

Nous avons donc commencé par pister manuellement plusieurs centaines de clics de cachalot en regroupant plusieurs de ces petits groupes de clics à la suite. Suite aux observations lors de ce difficile travail manuel, nous avons mis au point une méthode de pistage automatique dont nous dévoilons ci-dessous les premiers résultats pour ce beau record du 14 janvier.

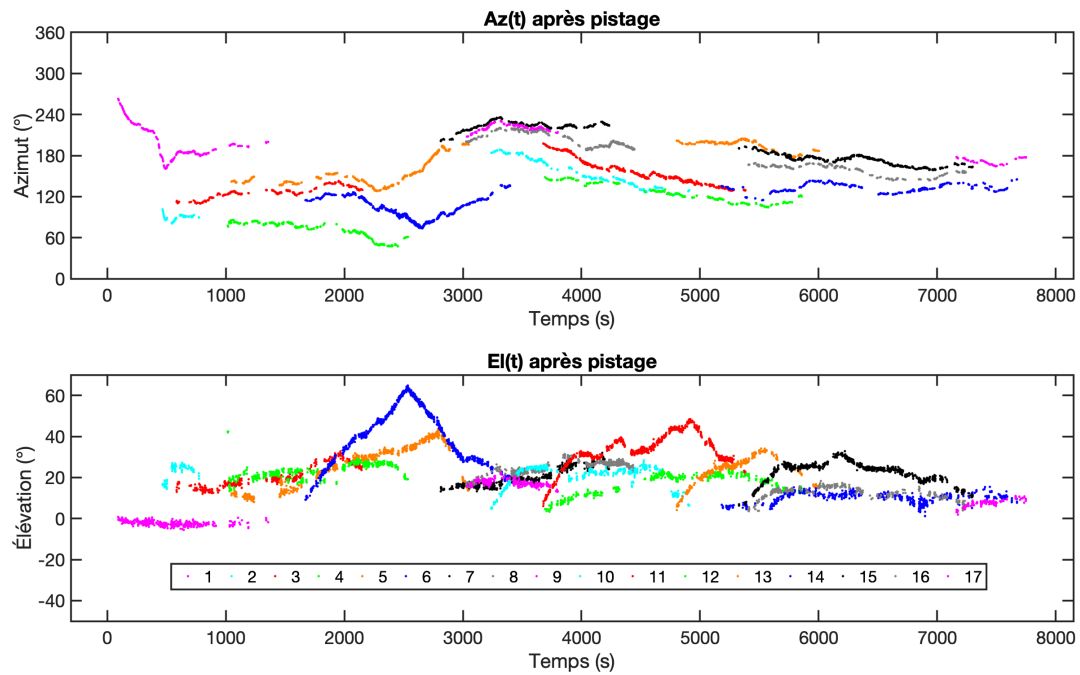


Figure 2.5: Azimut et Élévation, après pistage

Le pistage a non seulement séparé précisément les détections en fonction des pistes, mais a également eu pour effet secondaire de filtrer les détections. En effet il y a une piste "poubelle" qui regroupe tous les petits groupes de clics qui n'ont pas pu être associés aux pistes réelles. Cette piste 0 n'est pas affichée ici.

Notons également l'élévation étrange de la piste 1, que l'on pourrait associer à un "mirage" sur la coque du bateau. Elle sera écartée par la suite.

2.4 ESTIMATION DES POSITIONS 3D, SÉLECTION PAR LES RÉSIDUS

Nous avons vu qu'il est possible de calculer précisément la direction vers la source des émissions sonores. Cependant, une direction à elle seule ne suffit pas lorsque l'on veut localiser cette source. Nous devons en effet associer la direction à une distance pour déterminer sa position, et c'est l'objet de cette section.

2.4.1 SOLVEUR NON LINÉAIRE

En parallèle à la résolution du système d'équations linéaire, nous avons un deuxième solveur qui nous permet d'estimer la position 3D de la source (dans le repère de l'antenne). Ce solveur est basé sur la méthode des moindres carré, il est ainsi dit "non linéaire". Il consiste à minimiser une fonction de coût pour approximer la solution recherchée. Nous devons cependant garder à l'esprit la forte non linéarité, le fait que ce solveur est fortement biaisé, et peut tomber dans des minimums locaux ce qui peut donner parfois des résultats aberrants ou incorrects.

On initialise le solveur avec 4 positions (P_1, P_2, P_3, P_4) et on limite les résultats à un cube de 5000m de coté. Le solveur converge vers une solution pour chacune de ces 4 positions initiales et un résidu est calculé après chaque résultat, ce qui permet de juger de la "pertinence" des solutions (faible résidu = bon résultat).

La figure ci-dessous donne un aperçu des positions 3D estimées par le solveur non linéaire, pour le record entier, et la position initiale P_1 uniquement. (on a ces traces pour chaque position initiale)

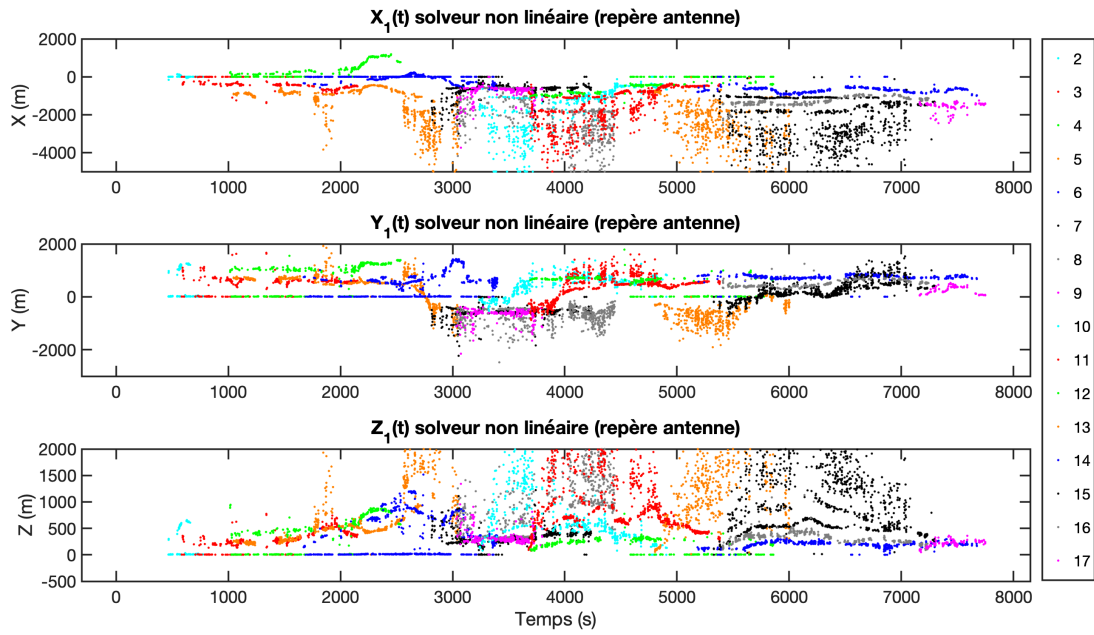


Figure 2.6: Coordonnées 3D des pistes estimées par le solveur non linéaire (initialisé à P_1)

On peut remarquer 2 choses qui sautent aux yeux. En premier lieu, le solveur converge souvent vers des positions $(0, 0, 0)$ du fait de sa nature à parfois tomber dans un minimum local. De plus les résultats sont parfois très bruités. Bien que nous l'utilisions en première estimation, ce solveur seul ne suffit pas à estimer correctement la position 3D des sources.

2.4.2 ESTIMATION DE LA DISTANCE

L'intérêt d'avoir initialisé pour plusieurs positions initiales est de nous permettre de sélectionner parmi les 4 résidus et donc les 4 positions 3D associées, quel triplet (X,Y,Z) est le plus adaptée à la détection. En réalité c'est un peu plus compliqué. On cherche en effet à estimer la distance. On l'a simplement grâce à la formule bien connue :

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}$$

Cependant nous devons aller plus loin que la simple sélection du meilleur résidu issu du solveur non linéaire pour sélectionner la distance D_i adéquate. C'est pourquoi, nous établissons un nouveau type de résidu qui permet de faire le lien avec notre solveur linéaire. Il s'agit du "Résidu Gisement", donnant une indication de corrélation fiable entre les résultats issus des 2 solveurs, linéaire et non linéaire.

Nous avons donc 4 Résidus XYZ (issus du solveur non linéaire) et 4 Résidus Gisement pour chaque détection. Nous pouvons créer grâce à eux le résidu final qui nous permet de sélectionner les distances.

$$Residu_i = ResXYZ_i + ResGis_i$$

et

$$Range = D(\operatorname{argmin}(Residu_i))$$

2.5 STABILISATION NUMÉRIQUE PAR L'ASSIETTE MPU

La centrale inertielle (MPU) est un instrument indispensable dans notre processus. En effet, le bateau, le drone, et donc les antennes, sont soumis aux effets de la houle, du vent... En conséquence, les angles de Roulis, Tangage, et Lacet varient au cours du temps. Lors des enregistrements, les clics et leur source sont détectés dans le repère de l'antenne. Nous devons donc ramener ces coordonnées dans un repère qui ne subit pas ces mouvements. C'est le repère absolu, formé par un plan parfaitement horizontal, considérant la convention Y:Nord, X:Est, Z vers le haut. Nous devons cependant passer par un repère intermédiaire, et donc faire la correction en deux étapes, d'abord avec les data MPU, puis avec le GPS.

Un travail préliminaire consiste à corriger les données du Compas, car celui-ci est sensible aux interférences électromagnétiques, mais aussi aux changements rapides de cap, dûs la plupart du temps à des vagues scélérates.

Une fois les données du compas exemptes de tout artefact, nous pouvons procéder à la correction MPU, et ainsi exprimer les coordonnées (X,Y,Z) dans le repère intermédiaire. Ce repère est formé par les axes X:Nord, Y:Est, Z vers le centre de la Terre et son origine est centrée sur l'antenne. On a donc

$$(X, Y, Z)_{MPU} = R.(X, Y, Z)_{ANT}$$

avec :

$$R = R_z(\alpha).R_y(\beta).R_x(\gamma)$$

R est la matrice de rotation globale formée par les 3 matrices de rotation élémentaires liées aux angles de lacet (yaw), tangage (pitch), et roulis (roll), respectant la convention Tait-Bryan et mesurés par notre MPU (Yocto-Puce 3D). On les définit comme suit :

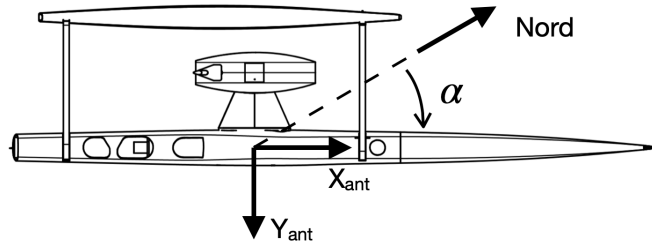


Figure 2.7: Angle de Lacet (yaw)

La matrice de rotation associée à l'angle de Lacet est :

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

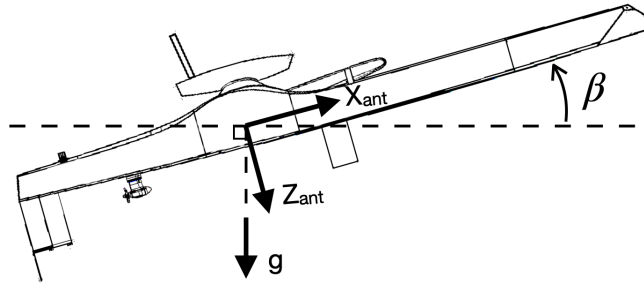


Figure 2.8: Angle de Tangage (Pitch)

La matrice de rotation associée à l'angle de Tangage est :

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

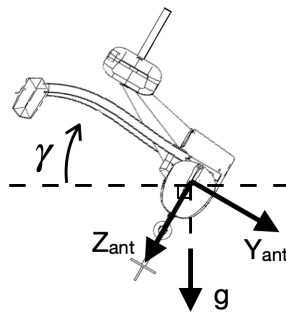


Figure 2.9: Angle de Roulis (Roll)

La matrice de rotation associée à l'angle de Roulis est :

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

Reste maintenant à prendre en compte le fait que l'antenne (le bateau/drone) se déplace au cours du temps. Il faut donc traiter les données GPS, instrument là encore indispensable. Pour ce faire, on commence par transformer les coordonnées (Latitude, Longitude) en coordonnées cartésiennes. Une fois les coordonnées (X,Y) de l'antenne déterminées, nous pouvons donc recentrer les coordonnées 3D des sources par rapport à ce nouveau repère absolu, et visualiser les trajectoires réelles des pistes, en 3D, au cours du temps !

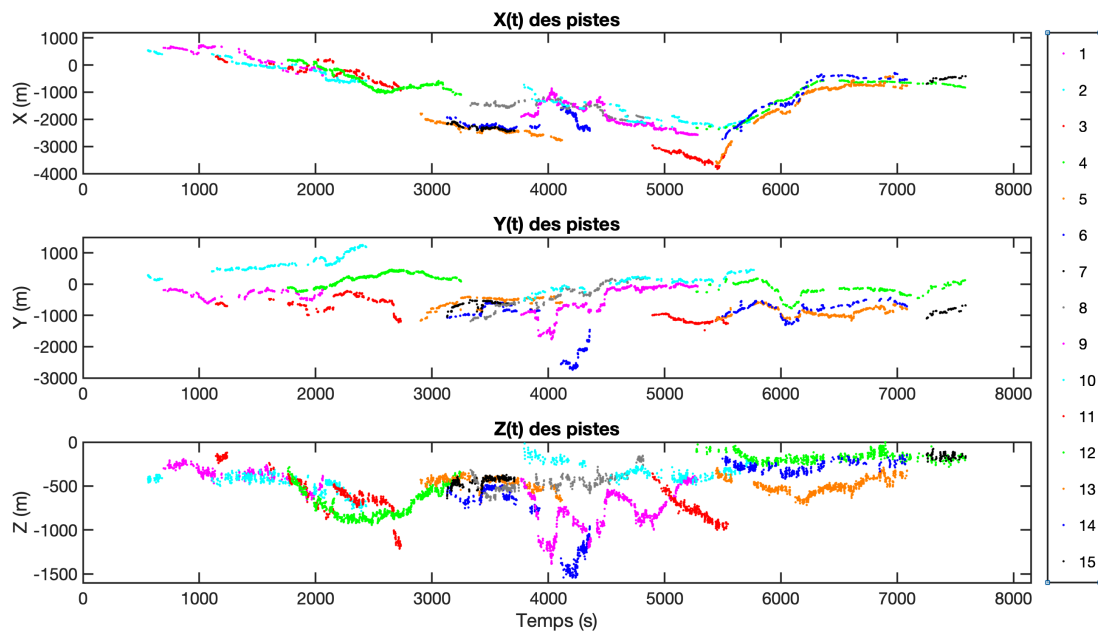


Figure 2.10: Coordonnées 3D des pistes en fonction du temps (repère absolu)

3

Ethoacoustique d'alliance de cachalots dans les Abysses

Les résultats obtenus suite à l'étude de trajectographie 3D nous permettent de représenter graphiquement les déplacements de l'essaim de cachalots observés. Une première mondiale !

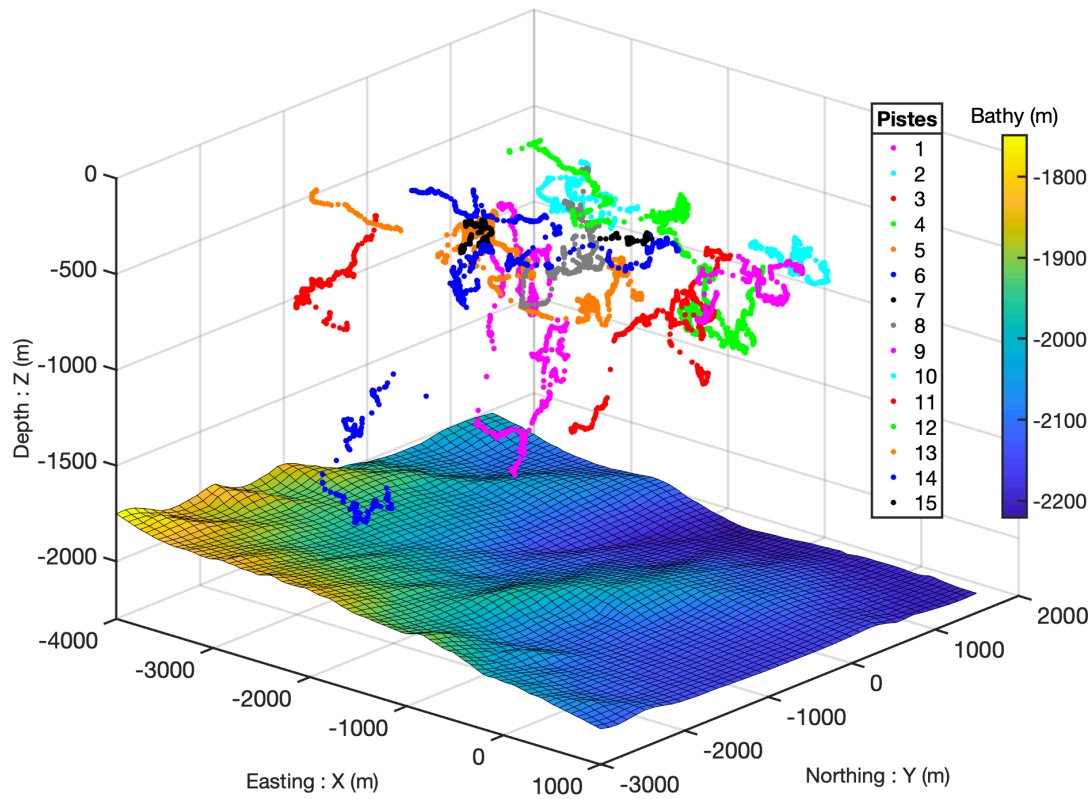


Figure 3.1: Traces 3D des déplacements des 15 pistes (record entier)

Afin d'entamer l'étude des trajectoires, ainsi que l'analyse comportementale des pistes, il est nécessaire de détailler au préalable les critères sur lesquels nous nous appuyons. En effet, déduire quelque chose d'un graphique est une première approche mais pour démontrer un comportement, nous devons nous conformer à des calculs précis, reproductibles. Ce chapitre a donc pour but de présenter les critères d'étude ainsi qu'une analyse globale.

3.1 VITESSES

La vitesse ascensionnelle est la vitesse à laquelle les pistes se déplacent selon l'axe vertical uniquement. Elle est positive en phase d'ascension, et négative en phase de plongée. Elle a été calculée comme suit : $V_z = 3.6 * (z_{i+1} - z_i) / (t_{i+1} - t_i)$ avec z_i en m la profondeur au temps t_i en s. La multiplication par 3,6 permet une conversion en km/h.

La vitesses instantanée a été calculée à partir des positions 3D lissées par médiane glissante (fenêtre de 10 valeurs). Le calcul a été fait pour chaque individu de la même façon que les vitesses ascensionnelles instantanées, mais en prenant en compte cette fois les trois coordonnées x, y et z.

La vitesse moyenne (resp ascensionnelle moyenne) a été calculée pour chaque piste et à chaque instant t. Il s'agit de la moyenne des vitesses instantannées (resp. ascensionnelles) dans une fenetre centrale glissante de 10 clics autour de l'instant t.

FIGURE MOYENNE DES VITESSES MOYENNES DES PISTES AU COURS DU RECORD

3.2 TORTUOSITÉ

La tortuosité est une grandeur utilisée en écologie comportementale et visant à estimer l'importance du caractère sinueux d'un chemin. Il existe un grand nombre d'indicateurs de la tortuosité, qui diffèrent en fonction du type de mouvement, et donc de chemin, réalisé par l'animal, ou du setup expérimental.

Ces différents indices peuvent ainsi refléter l'efficacité d'orientation de l'animal lors d'une recherche orientée, ou sa capacité à couvrir une aire de recherche importante lors d'une recherche de nourriture. Certains indices donnent directement une indication de la tortuosité tandis que d'autres y sont négativement corrélés.

Nous avons considéré le mouvement des *Pm* comme orienté lors de la recherche de proies, et avons ainsi utilisé un indicateur permettant d'estimer l'efficacité de l'orientation des individus. De plus nous avons utilisé les valeurs de tortuosité comme indicateur des périodes de chasse. Notre calcul de la tortuosité se base sur la formule de l'indice de droiture (Straightness) D/L , présenté notamment par Benhamou *et al.*^{4, 50, 9} et adapté à une traque en 3D, avec D et L tel que :

$$St = \frac{D}{L} = \frac{|(x_n - x_0; y_n - y_0)|}{\sum_{j=1}^n l_j} \quad (3.1)$$

avec l_j les longueurs des différents pas (ici constants), $(x_0; y_0)$ la position de départ et $(x_n; y_n)$ la position d'arrivée. De plus on a $0 < \frac{D}{L} < 1$, avec 0 correspondant à une marche aléatoire avec retour à l'origine et 1 à une ligne droite.

Cet indice est facile à calculer, et c'est de plus un estimateur non biaisé de l'efficacité de l'orientation dans un chemin orienté avec but à une distance finie. Puisque l'indice de droiture (Straightness) est inversement corrélé à la tortuosité, nous avons directement calculé celle-ci telle que :

$$Tort = \frac{L}{D} \quad (3.2)$$

Dans la suite de nos analyses, nous avons souvent utilisé $\log(Tort)$, plus parlant du fait de l'étendue des différentes valeurs de tortuosité. La figure ci-dessous illustre la tortuosité des pistes sur la totalité de l'enregistrement. Une fenêtre centrale de 16 clics a été choisie pour la calculer afin de représenter des phases de tortuosité distinctes malgré l'échelle de temps élevée (8000s).

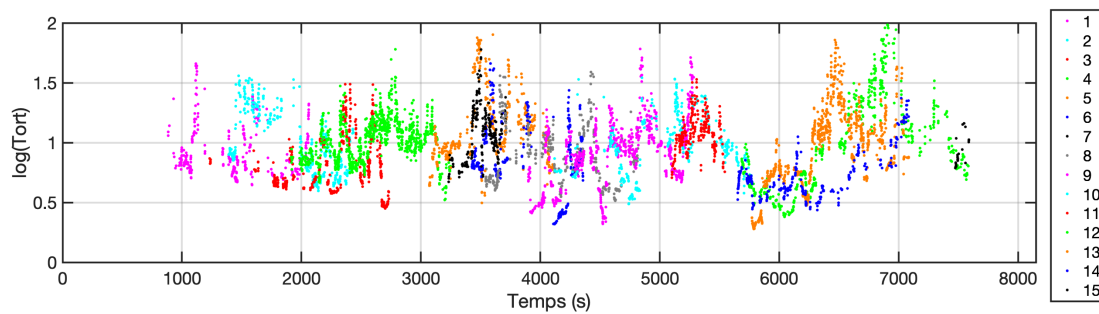


Figure 3.2: Tortuosité des 15 pistes (record entier)

Clairement, les pistes alternent entre des phases de déplacements peu tortueux, et des phases tortueuses, sans doute de prédation. Chaque pic pourrait signifier une capture de proie réussie.

Note : La fenêtre de calcul de la tortuosité est réduite à 16 clics pour l'étude individualisée, par piste pour refléter le changement d'échelle temporelle.

3.3 DISTANCES ENTRE PISTES (PDIST)

La distance entre chaque paire de pistes est un bon indice pour commencer à mesurer la coordination des pistes. Les détections étant asynchrones, pour calculer ces Pdist, nous choisissons d'appairer les pistes qui sont détectées dans une fenêtre centrale de 60 secondes autour de l'instant t . Cette fenêtre est glissante, d'un pas de temps d'une seconde.

Le calcul n'est possible que lorsque 2 pistes au minimum sont détectées au sein d'une même fenêtre temporelle, ce qui donne lieu à 1 distance. Pour 3 pistes, cela donne 3 couples possibles et donc 3 distances calculées, et ainsi de suite. Enfin nous calculons la moyenne de ces distances à chaque instant ce qui donne la figure ci-dessous.

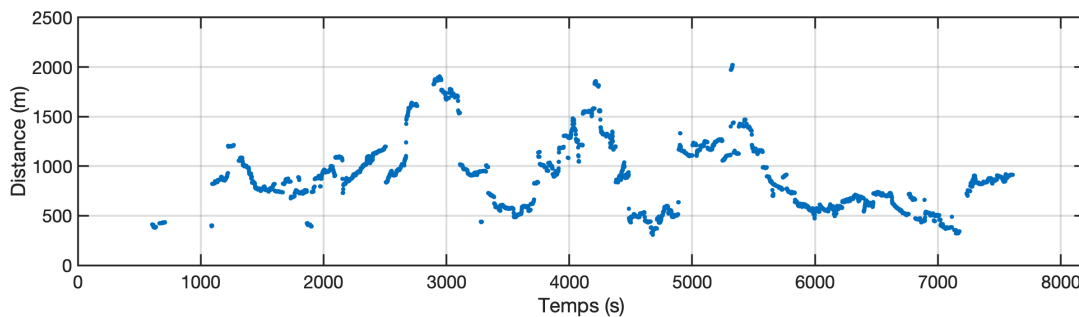


Figure 3.3: Moyenne des distances entre les pistes

Nous distinguons très clairement les morceaux de la courbe qui sont continus, fluides. Cela signifie que les pistes évoluent de manière coordonnée à ces mêmes instants puisque la moyenne des distances entre les pistes varie en douceur.

Nous pouvons également constater que les distances entre les pistes peuvent doubler au moment des plongées, notamment autour de 3000s, 4000s et 5000s (cf. Figure 2.10, graphe $Z(t)$ notamment).

3.4 CODIRECTION

Le critère de codirection permet de faire un lien direct avec la coordination des pistes. En effet, lorsqu'on parle de déplacement d'une piste, on le modélise sous la forme d'un vecteur. Ce vecteur peut être plus ou moins colinéaire avec le vecteur déplacement d'une autre piste, indiquant si oui ou non les pistes se déplacent de concert. Cependant, nous avons besoin de quantifier ce critère. Pour cela nous calculons la codirection grâce à un outil mathématique parfaitement adapté : le produit scalaire.

$$Codir(t) = \frac{1}{n} \sum \langle D_p(t), D_m(t) \rangle$$

avec :

n : nombre de pistes observées à l'instant t

D_m : le vecteur déplacement moyen des pistes

D_p : le vecteur déplacement de chaque piste

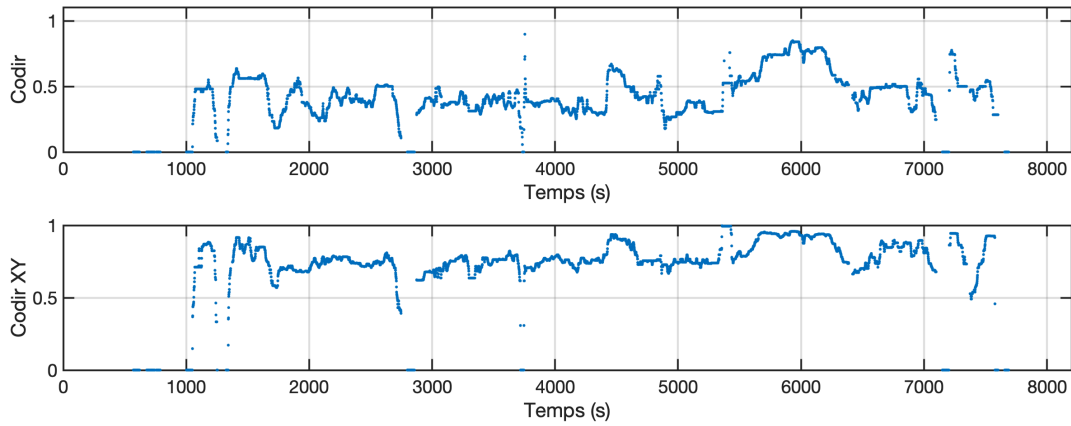


Figure 3.4: Codirection des pistes (en 3D et dans le plan XY)

A COMPLETER : Commentaire

3.5 ANALYSE GLOBALE

Au cours de cet enregistrement, nous pouvons identifier des schémas relatifs à la profondeur, aux positions 3D ainsi qu'à la tortuosité. Certaines de ces observations sont fascinantes. Nous montrons par exemple la coordination (au travers des distances inter-pistes) en fonction de la profondeur (Figure 3.5) ainsi que la coordination en fonction de la tortuosité (figure xx).

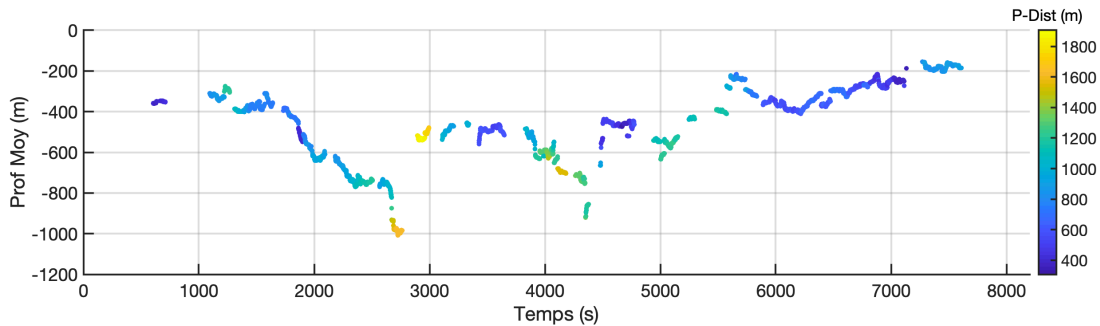


Figure 3.5: Evolution jointe des distances entre pistes ainsi que de leur profondeur moyenne

La majorité des animaux semblent commencer à cliquer à environ -500m et se regrouper à cette même profondeur. Puis, il est possible que les prédateurs entrent dans un mode de recherche puisque d'autres animaux commencent à cliquer. Pendant cette période, certains peuvent plonger jusqu'à une profondeur de 1200m et tous maintiennent des distances de séparation allant de 300 à 700m entre eux.

Nous constatons également une augmentation de la tortuosité pendant cette phase de recherche qui pourrait indiquer les prémices d'une chasse avec localisation de proie. Puis, les cachalots semblent s'agiter de plus en plus, (variations élevées et rapides en profondeur

mais aussi en X et Y) ce qui indiquerait une entrée en phase de traque de proie. Enfin, l'arrêt des clics pourrait correspondre au succès de la capture. Toutes ces observations nous font penser que les cachalots coordonnent leurs chasses et emploient très probablement des stratégies/schémas répétés, identifiables, pour rabattre leurs proies et les capturer. Nous allons même jusqu'à penser qu'ils pourraient communiquer via des coda de clics pour se coordonner entre eux.

3.6 TOPO MONACO (SECTION TEMPORAIRE POUR REFERENCE)

Même si ces cachalots sont distants de 500 m les uns des autres, leurs actions sont concertées et leurs déplacements synchrones.

Un individu qui sonde recueille des informations sur le fond et les proies qui s'y trouvent par l'écho du son qu'il émet. Ces mêmes signaux pourraient être entendus par les voisins de son Alliance*, qui écoutent dans la même direction. Ces derniers émettent aussi un son, qui donne de l'information complémentaire à celle obtenue par le premier individu. C'est un échange en direct. Il est aussi imaginable qu'ils se transmettent, les uns aux autres, des signaux décrivant ce qu'ils perçoivent. Ils pourraient en tirer un bénéfice, en qualité de perception de leur environnement : l'ensemble des échos des sons émis par les membres de l'Alliance dépasserait chaque perception individuelle.

On voit sur l'animation qu'à la suite de ces Alliances, certains cachalots suivent des trajectoires plus profondes vers -1700 m au large de Monaco. Ils balayent alors un grand volume d'eau, et capturent probablement plusieurs calmars.

* L'Alliance est un lien coopératif qui persiste au cours du temps entre les alliés. C'est un mode connu chez les grands prédateurs (lions, loups par exemples.). Le cas le plus étudié

d'Alliance chez les cétacés sont les paires ou triplets de grands dauphins (*Tursiops Truncatus*) qui coopèrent pour différentes tâches. Une Alliance est souvent entre individus d'une même famille.

Pour les cachalots, jamais une Alliance en chasse n'avait été observée.

4

Ethoacoustique des formes espace-temps des sondes de cachalots

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus suite à la mission Sphyrna et aux analyses de données. Les grandeurs étudiées dans ce chapitre sont :

- La profondeur
- L'intervalle inter-clic
- La Tortuosité
- La vitesse moyenne
- La vitesse instantanée
- La vitesse ascensionnelle moyenne
- La vitesse ascensionnelle instantanée

L'intervalle inter-clic correspond à l'intervalle de temps entre deux clics consécutifs. Les différentes vitesses étudiées ici ainsi que la tortuosité ont été calculées suivant les méthodes présentées dans le chapitre précédent, section 3.1.

4.1 ESTIMATIONS DES DENSITÉS DE PROBABILITÉ

Les histogrammes 2D (Voir Annexe) représentant les liens entre nos différents paramètres (profondeur, vitesse moyenne, vitesse instantanée, vitesse ascensionnelle moyenne, vitesse ascensionnelle instantanée, logarithme de l'intervalle inter-clic (ICI), logarithme de la tortuosité), ont été calculés à partir des modules pandas, numpy et matplotlib.pyplot sous Python. L'histogramme en lui-même a été tracé par la fonction hist2D de matplotlib.pyplot. Les estimations de densité de probabilité ont, elles, été tracées directement avec la fonction kdeplot de

seaborn sous Python. Tous les graphiques ont été réalisés pour chaque individus et à l'échelle du groupe de Pm .

4.2 VARIATION DE LA VITESSE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Pour plus de détails sur le calcul des vitesses, voir ??.

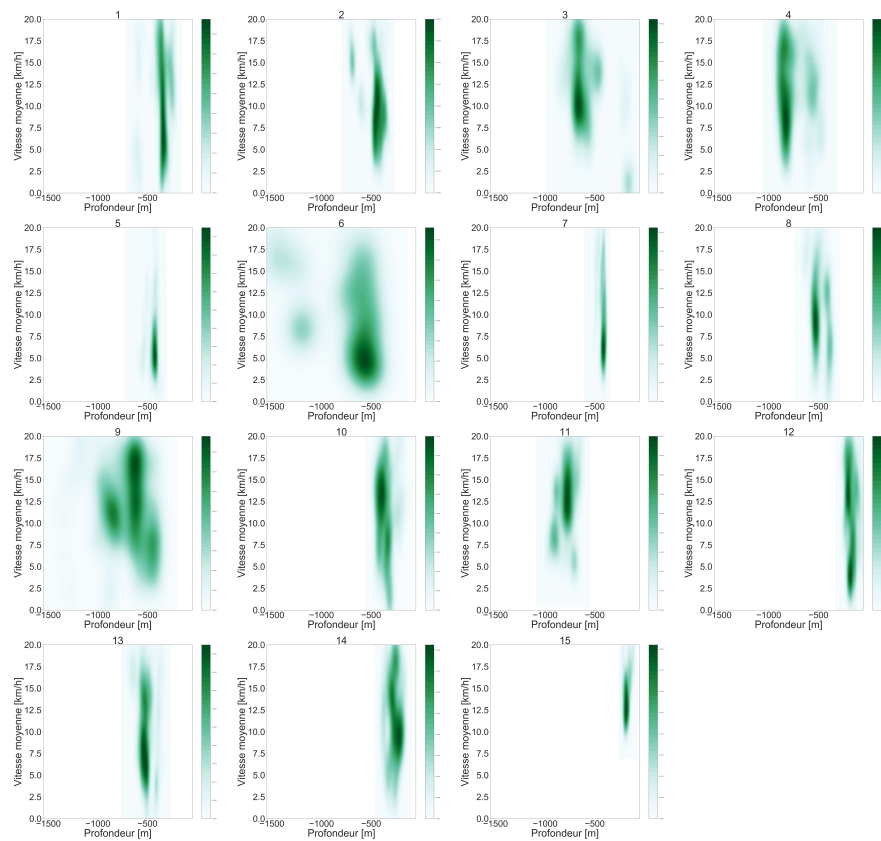


Figure 4.1: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse moyenne en fonction de la profondeur

En ce qui concerne la vitesse instantanée, on observe une densité de probabilité maximale pour des vitesses allant de 2,5 à 20 km/h associées à des profondeurs en moyenne autour de -600m. On a cependant une certaine variabilité entre les différentes pistes, avec certaines pistes présentant des densités de probabilité à deux maxima, le deuxième se trouvant autour de -200m mais aussi parfois de -800m.

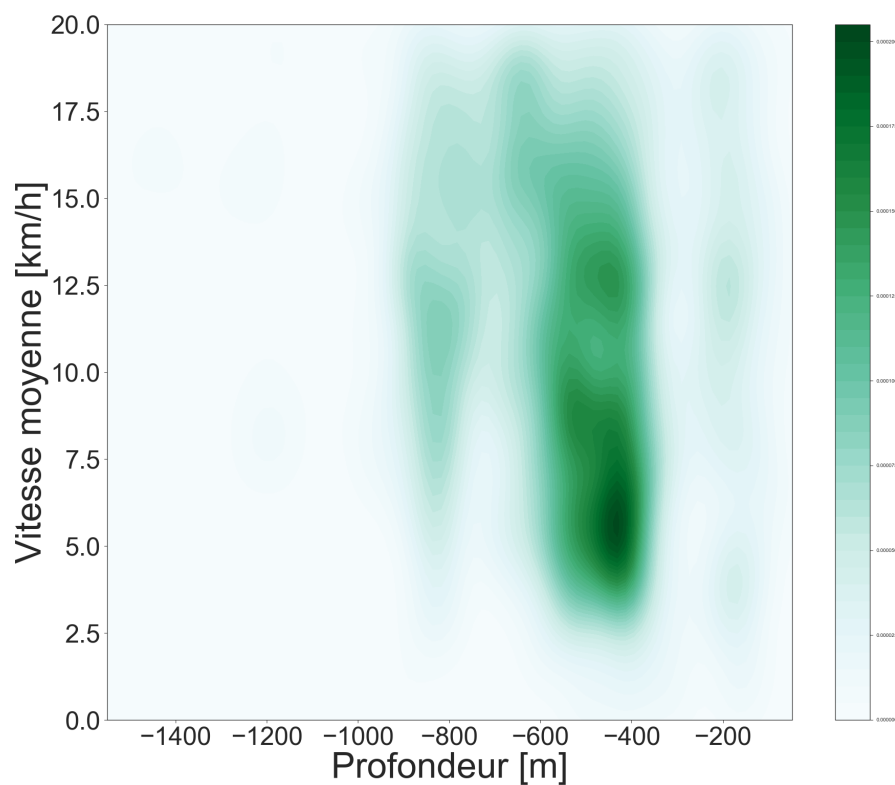


Figure 4.2: Estimation de la densité de probabilité globale de la vitesse moyenne en fonction de la profondeur

Au niveau global, on observe plutôt une distribution trimodale, avec un maximum de den-

sité de probabilité autour de -600m et deux autres : un plus faible à -800m et un beaucoup plus faibles à -200m.

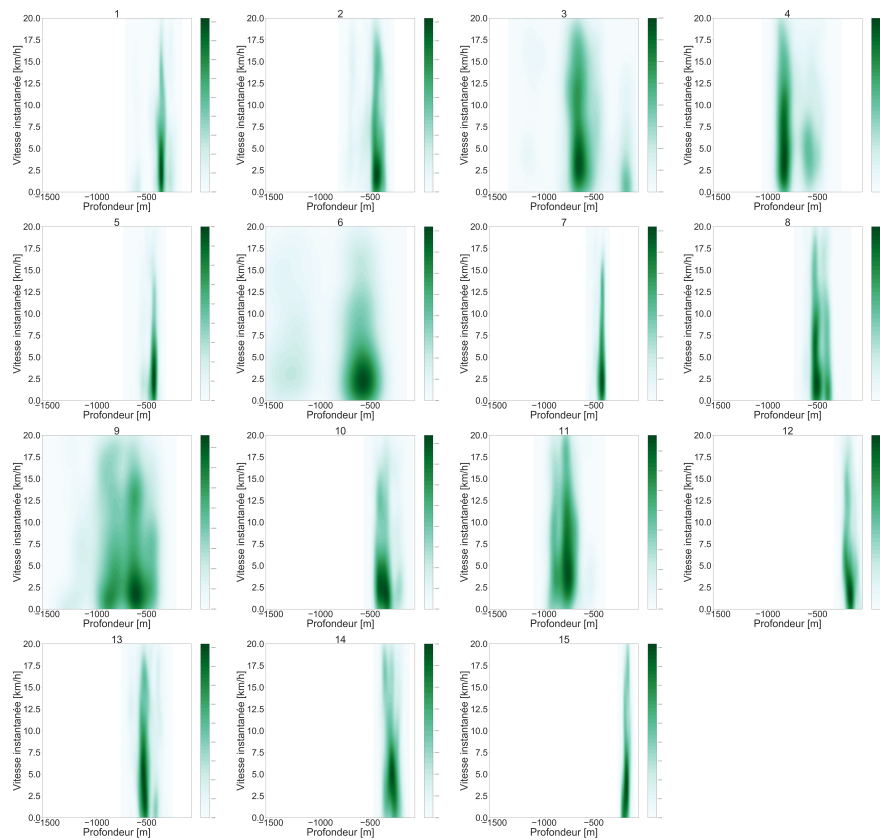


Figure 4.3: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse instantanée en fonction de la profondeur

Pour ce qui est de la vitesse moyenne on observe des vitesses majoritairement entre 2,5 et 20km/h. Les densités de probabilité sont globalement homogènes, mais il semble se dégager deux maximas correspondant à des vitesses de respectivement 7,5 et 15km/h. Ces vitesses

correspondent à des profondeurs très peu dispersées. Celles-ci, en fonction des pistes, varient entre -1400m et -300m de profondeurs, mais sont majoritairement regroupées entre -700 et -400m. Ce patron ressemble quelque peu, au niveau de la profondeur, à celui de la vitesse instantanée.

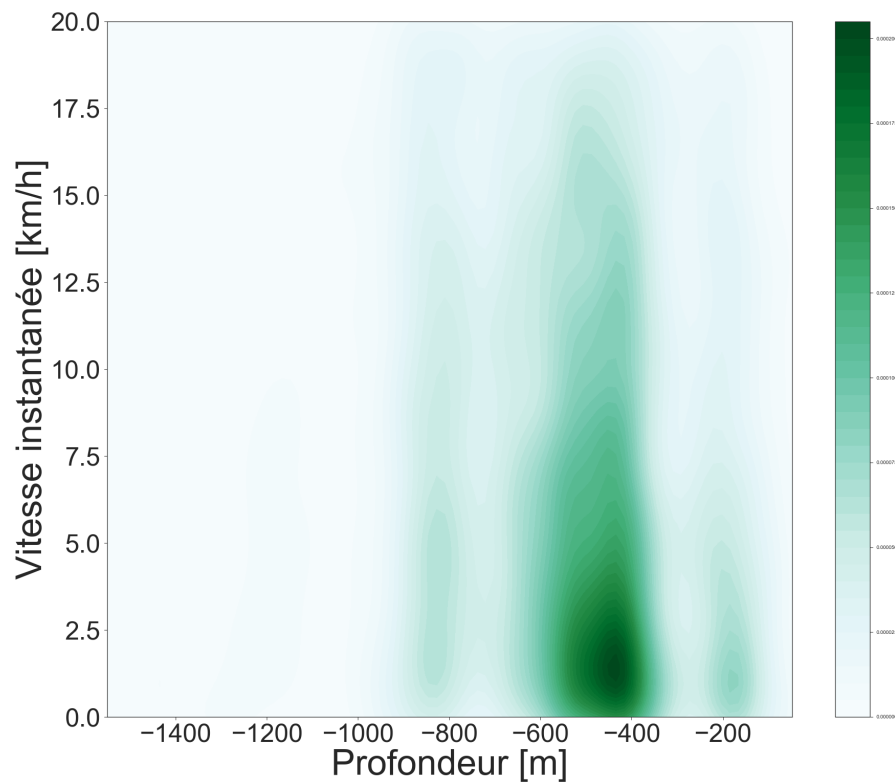


Figure 4.4: Estimation de la densité de probabilité globale de la vitesse instantanée en fonction de la profondeur

Le patron est globalement le même à l'échelle du groupe de Pm .

4.3 VARIATION DE LA VITESSE ASCENSIONNELLE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Pour plus de détails sur le calcul des vitesses, voir ??.

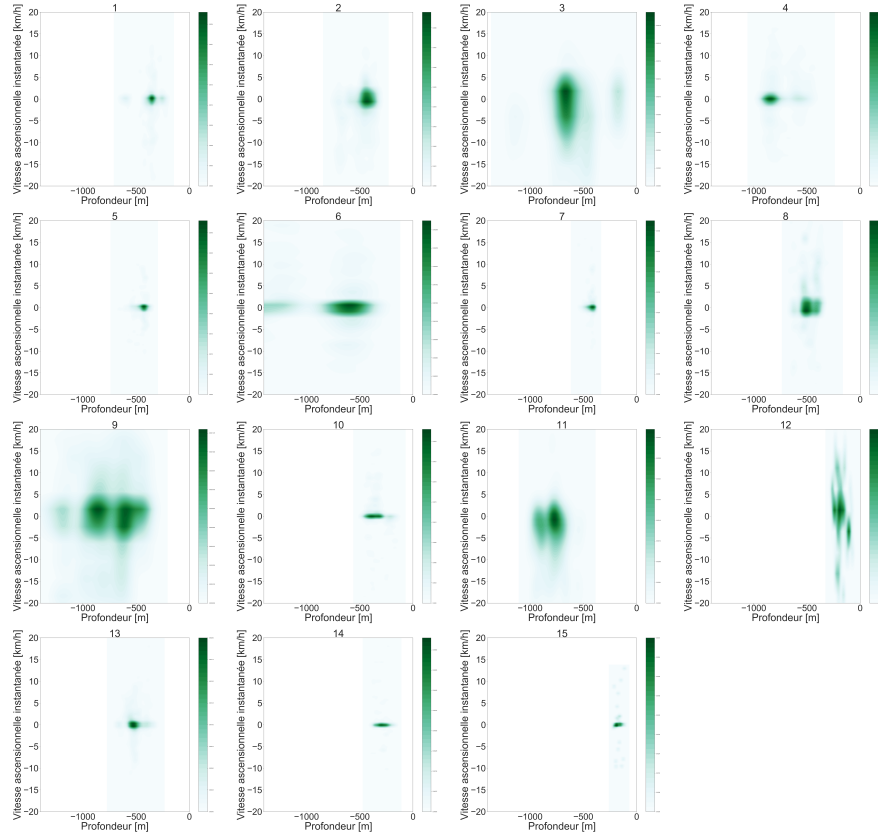


Figure 4.5: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse ascensionnelle instantanée en fonction de la profondeur. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

Pour ce qui est de la vitesse ascensionnelle instantanée, on a dans une majorité des pistes,

une vitesse densité de probabilité très resserrée autour d'une vitesse ascensionnelle nulle, et pour des profondeurs entre -600m et -400m. Dans quelques cas, la densité de probabilité est plus étalée le long des vitesses, et peut aussi présenter deux autres maxima à des profondeurs autour de -800m et -200m.

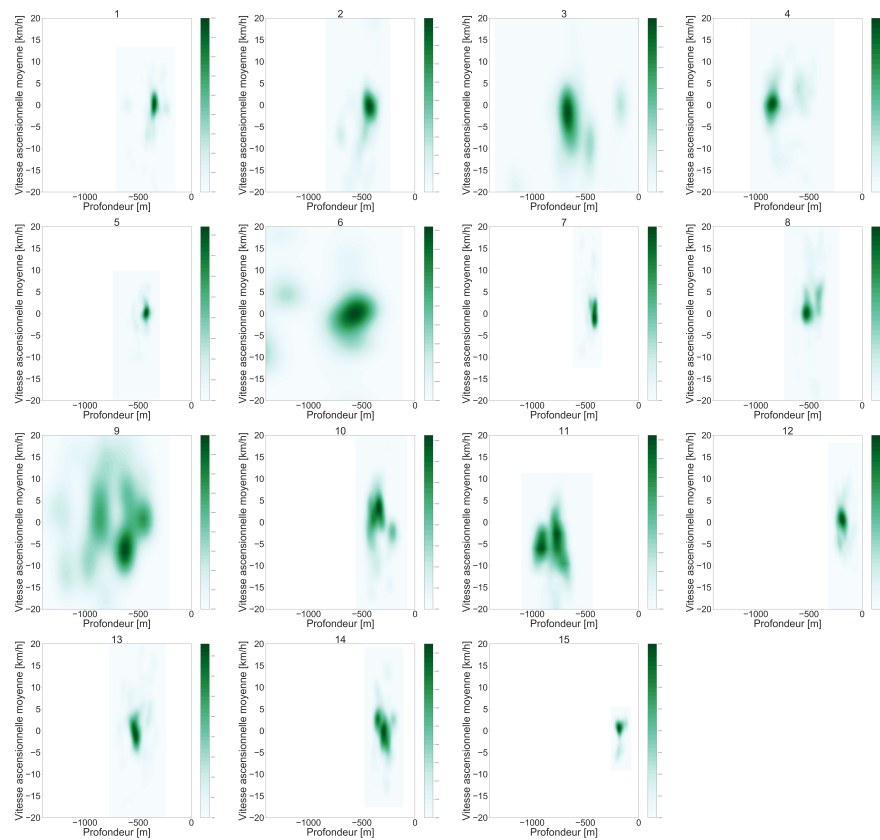


Figure 4.6: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse ascensionnelle moyenne en fonction de la profondeur. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

La vitesse ascensionnelle moyenne a, elle une densité de probabilité globalement plus étalée au niveau des vitesses dans les différentes pistes, bien que toujours centrée sur une vitesse nulle. On trouve aussi plus de pistes présentant deux voir trois maxima, à des profondeurs allant cette fois de -800m à -400m.

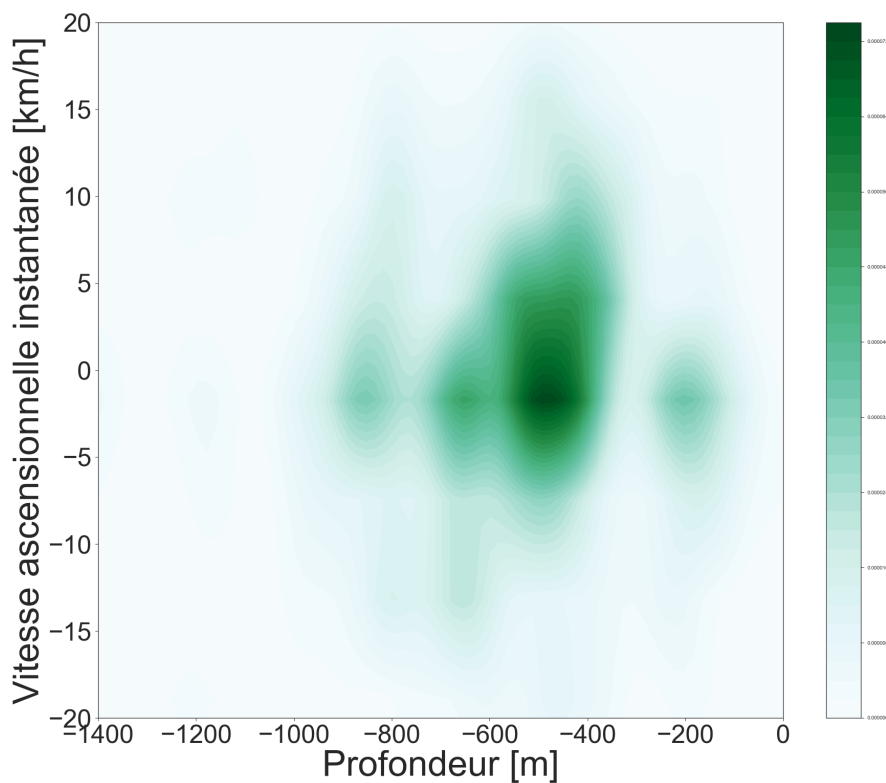


Figure 4.7: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse ascensionnelle instantanée en fonction de la profondeur. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

A l'échelle globale, on retrouve le même patron qu'à l'échelle individuelle pour la vitesse

ascensionnelle instantanée, à ceci près que trois (voir quatre) maxima de densité de probabilité sont visibles, pour des valeurs de vitesse centrées sur 0 et des profondeurs respectivement à -800, (-600), -500 et -200m.

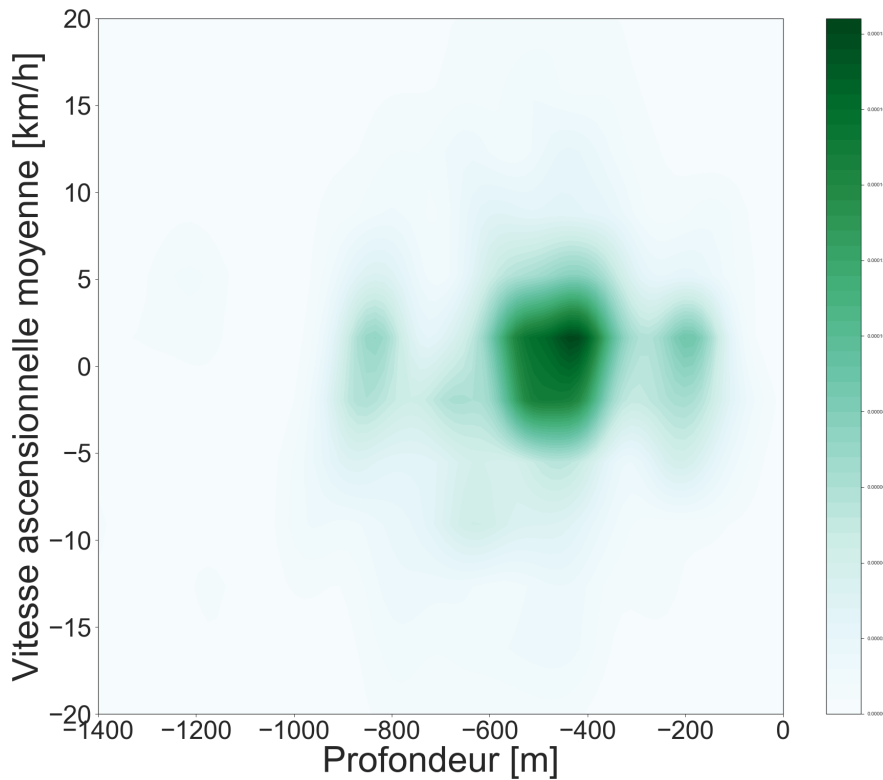


Figure 4.8: Estimation de la densité de probabilité de la vitesse ascensionnelle moyenne en fonction de la profondeur.
Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

La densité de probabilité globale pour la vitesse ascensionnelle moyenne montre le même patron que pour la vitesse ascensionnelle instantanée.

4.4 VARIATION DE $\log(\text{ICI})$

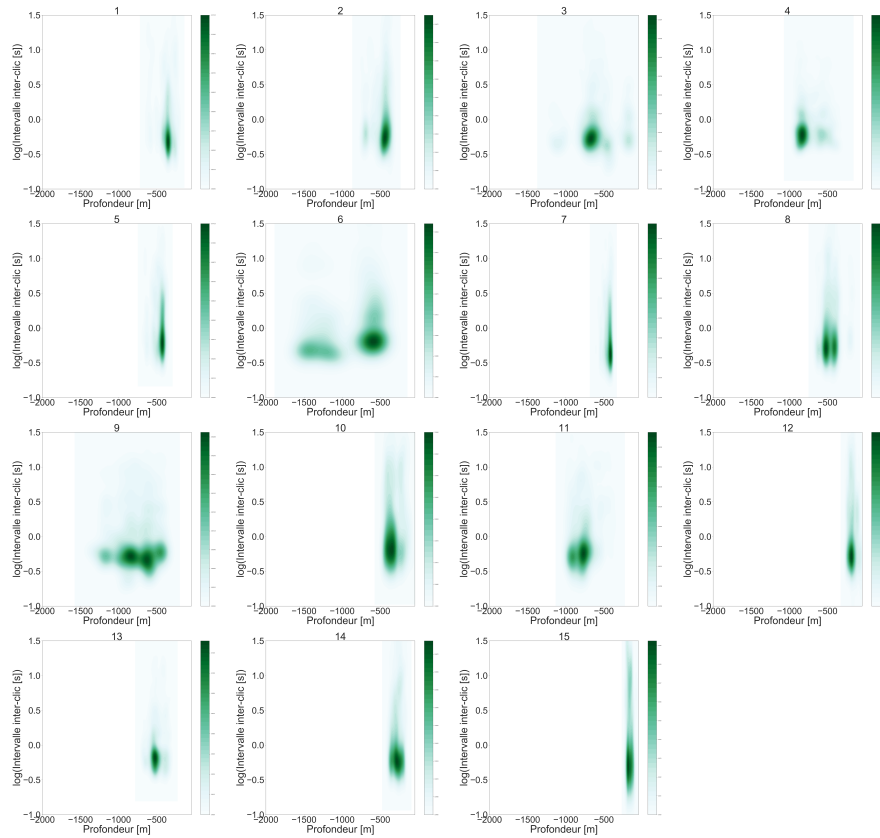


Figure 4.9: Estimation de la densité de probabilité du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la profondeur

Pour la majorité des pistes, on a une densité de probabilité maximale pour un $\log(\text{ICI})$ minimal (entre -0,25 et -0,5) à une profondeur -500/-400m. Quelques pistes présentent deux maxima, le deuxième se situant autour de -1100. La densité de probabilité est maximale pour

ces deux profondeurs et pour cette valeur de $\log(\text{ICI})$.

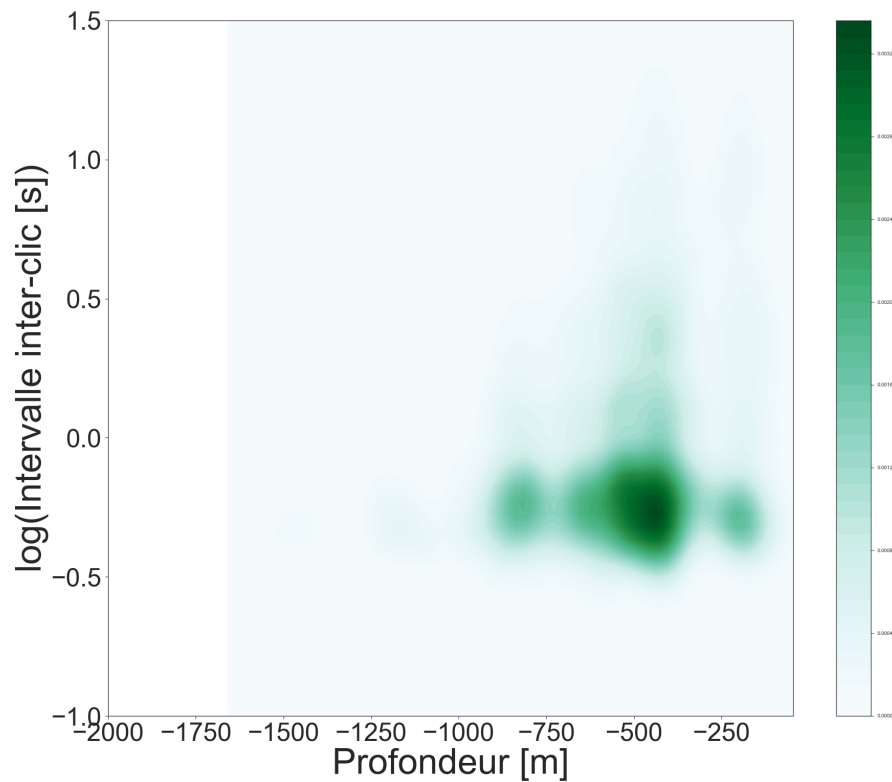


Figure 4.10: Estimation de la densité de probabilité globale du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la profondeur

Le même schéma qu'à l'échelle individuelle s'observe également à l'échelle de la population, on notera tout de même un maximum principal autour de -500m et deux maxima locaux pour -750 et -250m, le tout situé dans des valeurs de $\log(\text{ICI}) = -0,4$.

Pour plus de détails sur le calcul des vitesses, voir ??.

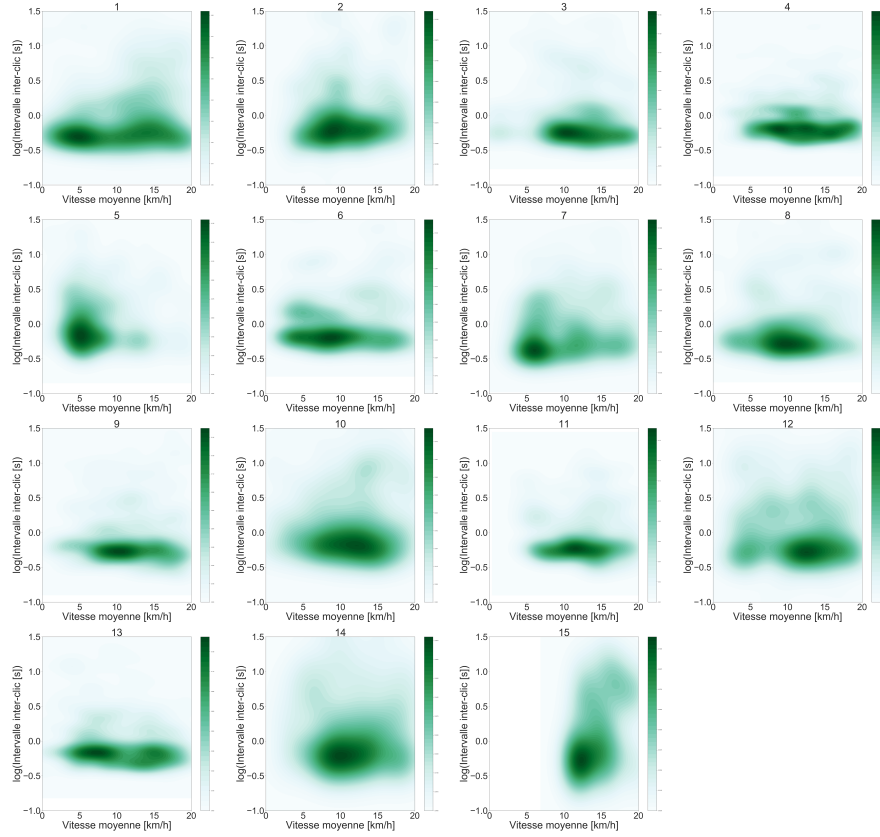


Figure 4.11: Estimation de la densité de probabilité du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse moyenne

Pour ce qui est de la vitesse moyenne, les densités de probabilités maximale de trouvent au niveau des valeurs de $\log(\text{ICI})$ majoritairement concentrées autour de $-0,5$. Les valeurs entre 0 et $0,5$ sont associées à des densités de probabilités plus faibles. On observe deux maxima de densité de probabilité pour des valeurs de vitesse moyenne de 5 et $17,5$ km/h pour la valeur de $\log(\text{ICI})$ de $-0,5$. Les $\log(\text{ICI})$ positifs sont globalement associés à des vitesses autour de

8km/h en moyenne.

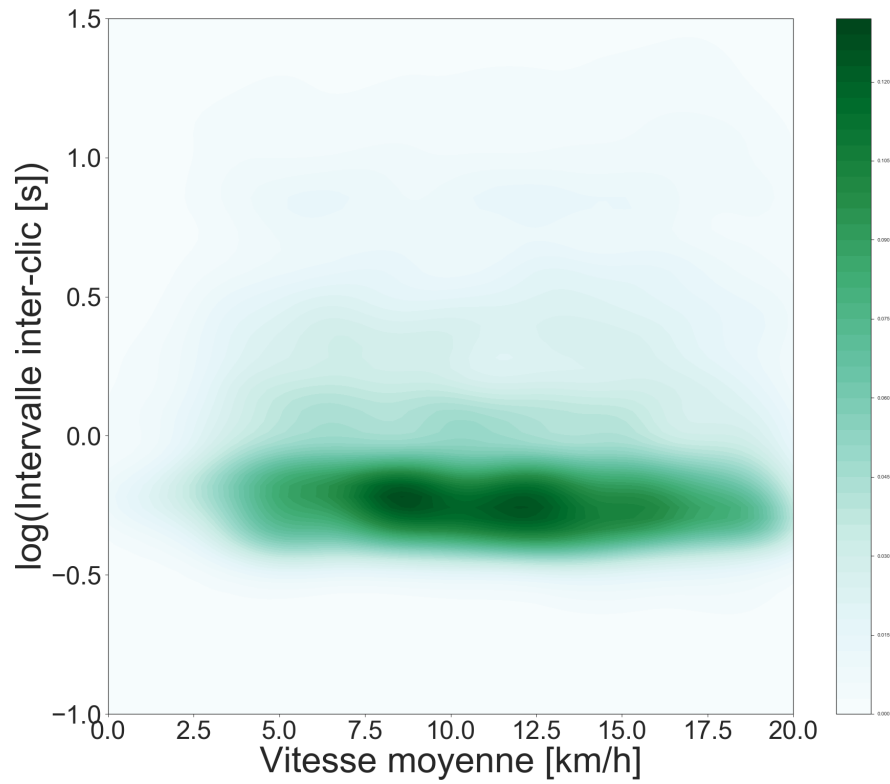


Figure 4.12: Estimation de la densité de probabilité globale du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse moyenne

A l'échelle du groupe, les valeurs de densités de probabilité maximales se situent au niveau de log(ICI) entre 0 et 0,5 et pour des vitesses allant de 5 km/h à 20 km/h.

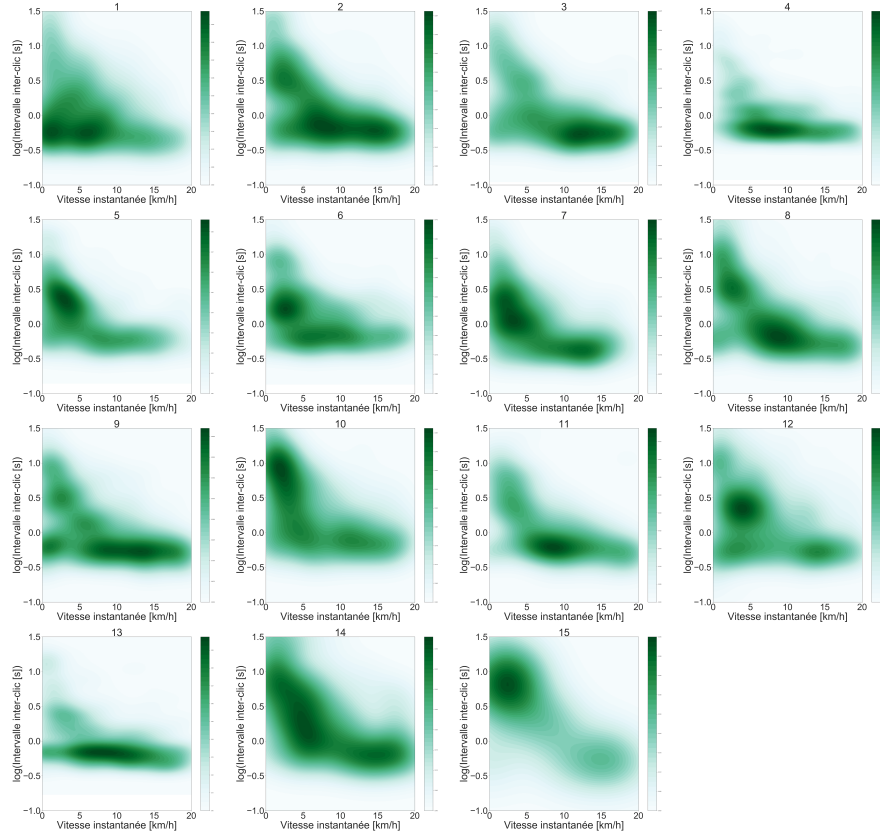


Figure 4.13: Estimation de la densité de probabilité du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse instantanée

Pour la vitesse instantanée, on voit une très nette diminution de l'intervalle inter-clic lorsque la vitesse augmente. On peut schématiquement observer trois maxima de densité de probabilité : un correspondant à des valeurs de $\log(\text{ICI})$ de 1 et une vitesse de 2,5 km/h, un autre correspondant à des valeurs de $\log(\text{ICI})$ entre 0,5 et 0 et une vitesse un peu en dessous de 5 km/h, et enfin un maximum pour un $\log(\text{ICI})$ autour de -0,5 et une vitesse de l'ordre de

17km/h.

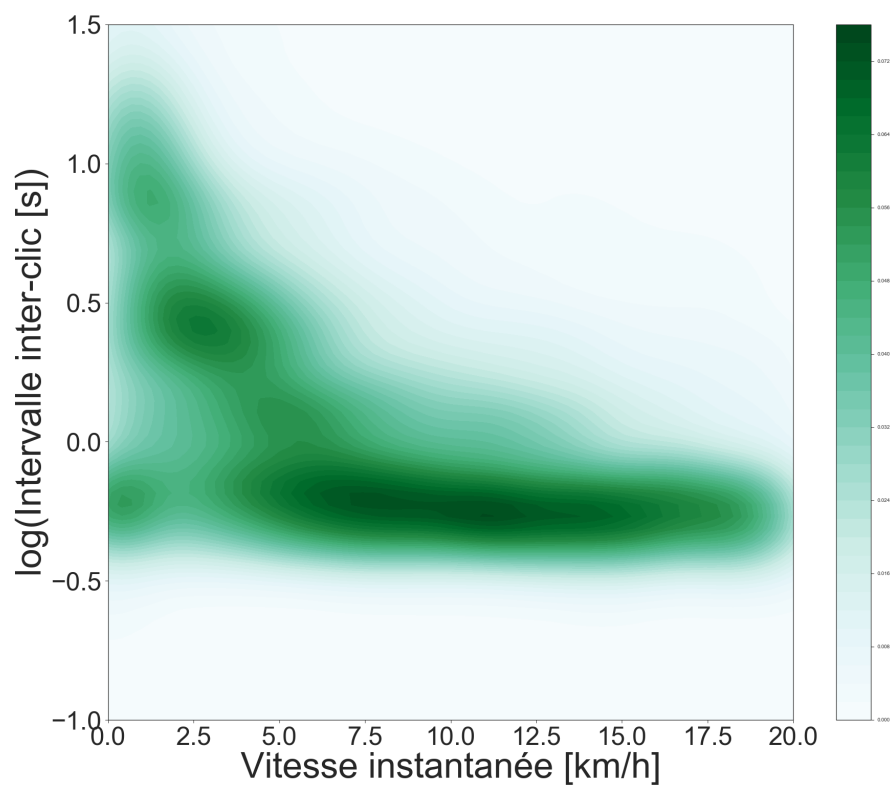


Figure 4.14: Estimation de la densité de probabilité globale du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse instantanée

Le même schéma s'observe à l'échelle globale et à l'échelle individuelle.

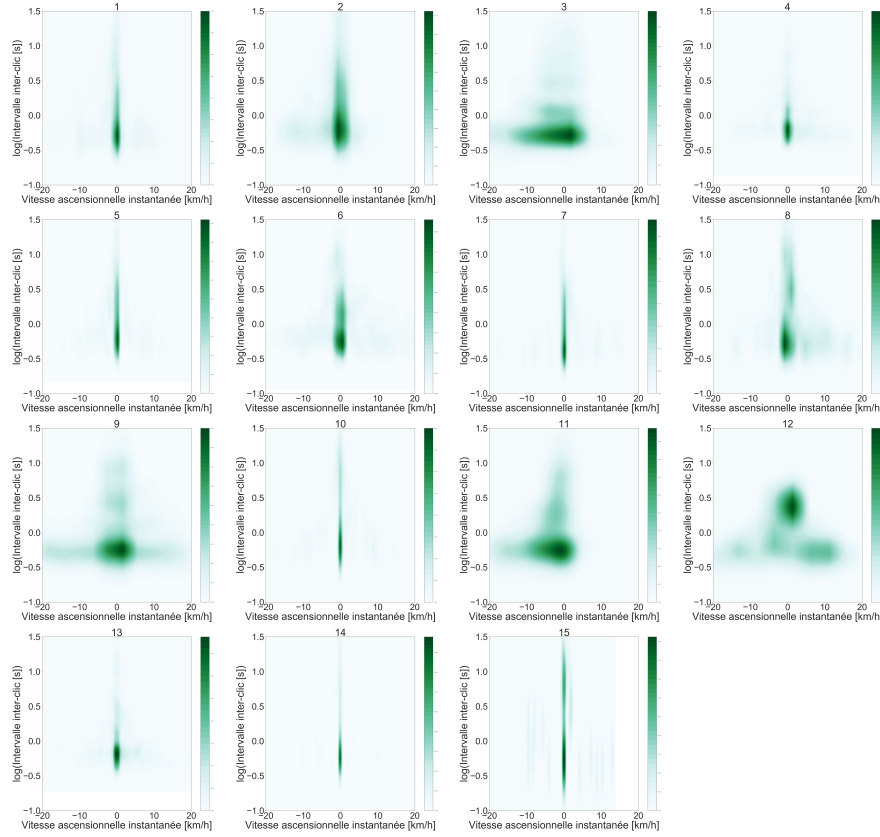


Figure 4.15: Estimation de la densité de probabilité du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse ascensionnelle instantanée. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

Pour la vitesse ascensionnelle instantanée, elle semble globalement centrée autour d'une vitesse nulle, excepté pour quelques pistes, montrant plutôt un mouvement de plongée. On observe un maximum de densité de probabilité très visible à $\log(\text{ICI}) = -0,5$ environ, et sur certaines pistes, un maximum local de densité de probabilité autour de $\log(\text{ICI}) = 1$. (Rappel

: les vitesses négatives correspondent à un mouvement descendant, et les vitesses positives à un mouvement ascendant).

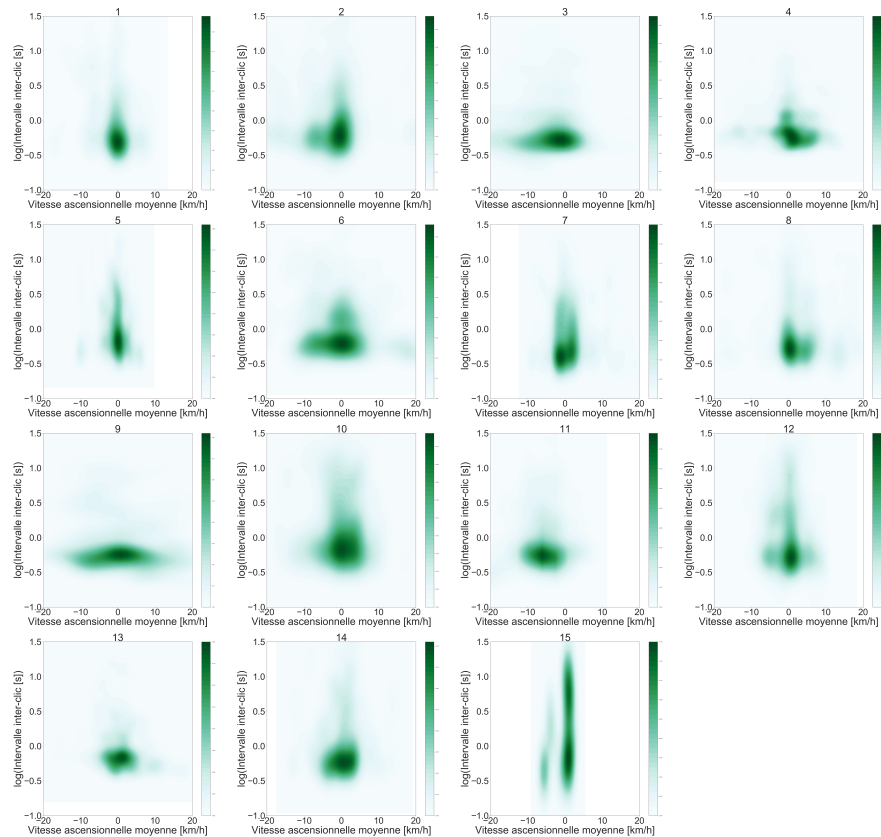


Figure 4.16: Estimation de la densité de probabilité du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse ascensionnelle moyenne. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

En ce qui concerne la vitesse ascensionnelle moyenne, la distribution ressemble à celle de

la vitesse ascensionnelle instantanée. Cependant on peut observer une répartition plutôt bimodale, et plus étalée de la densité de probabilité, selon la vitesse, avec deux maxima respectivement à une vitesse de 0 et de 5 (ou -5 sur certaines piste) km/h. La répartition selon $\log(\text{ICI})$ est très proche de celle visible pour la vitesse ascensionnelle instantanée.

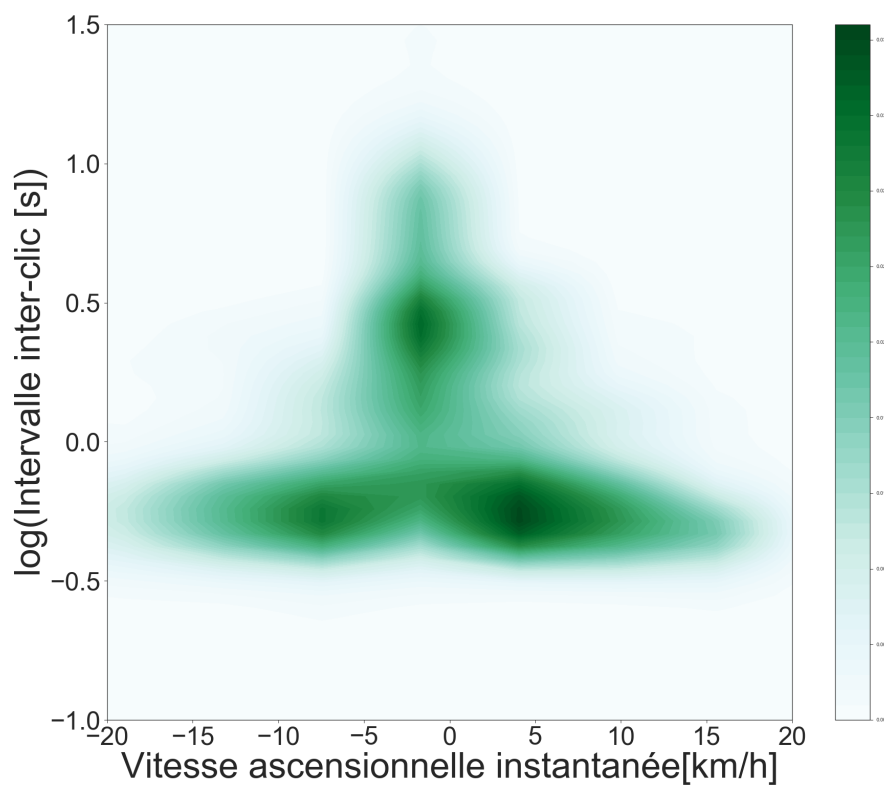


Figure 4.17: Estimation de la densité de probabilité globale du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse ascensionnelle instantanée. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

Au niveau globale, pour ce qui est de la vitesse ascensionnelle instantanée, la densité de

probabilité est répartie symétriquement de part et d'autre de la vitesse nulle. On observe ainsi deux maxima pour des vitesses entre 5/10 et -5/-10 km/h et un log(ICI) d'environ 0,5. Deux autres maxima sont visibles pour une vitesse légèrement inférieure à 0 et des log(ICI) respectivement de 0,5 et 1.

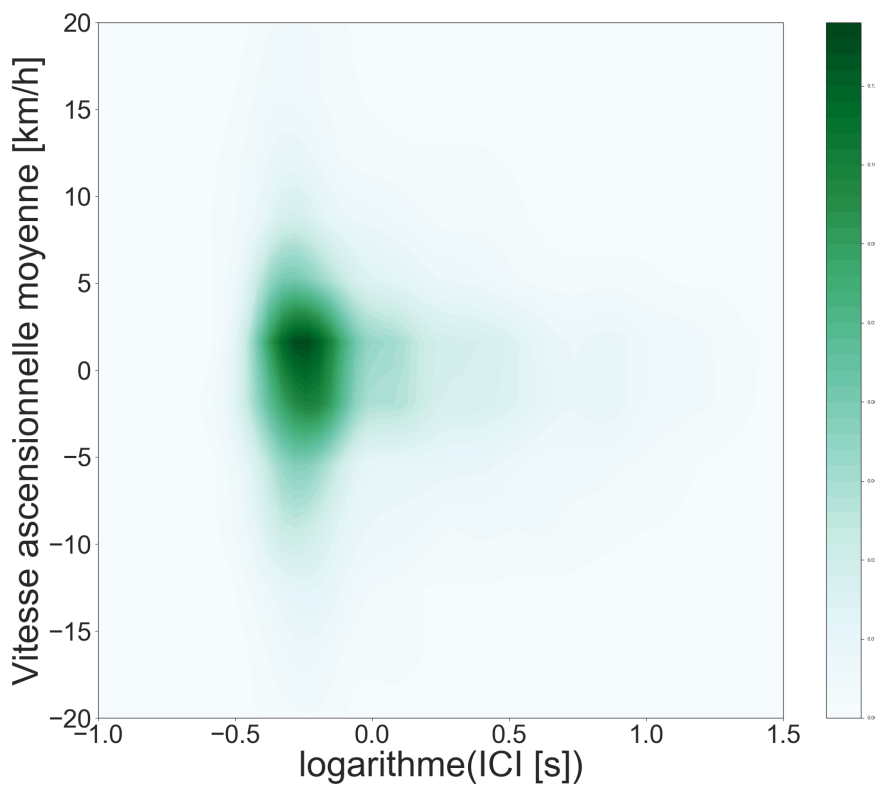


Figure 4.18: Estimation de la densité de probabilité globale du log de l'intervalle inter-clic en fonction de la vitesse ascensionnelle moyenne. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

Au niveau global, la vitesse ascensionnelle moyenne, elle est très centrée autour de 0 km/h

et $\log(\text{ICI})=0,25$. On observe qu'un seul maximal de densité de probabilité contrairement à la distribution individuelle.

4.5 TEMPS PASSÉ À UNE PROFONDEUR DONNÉE

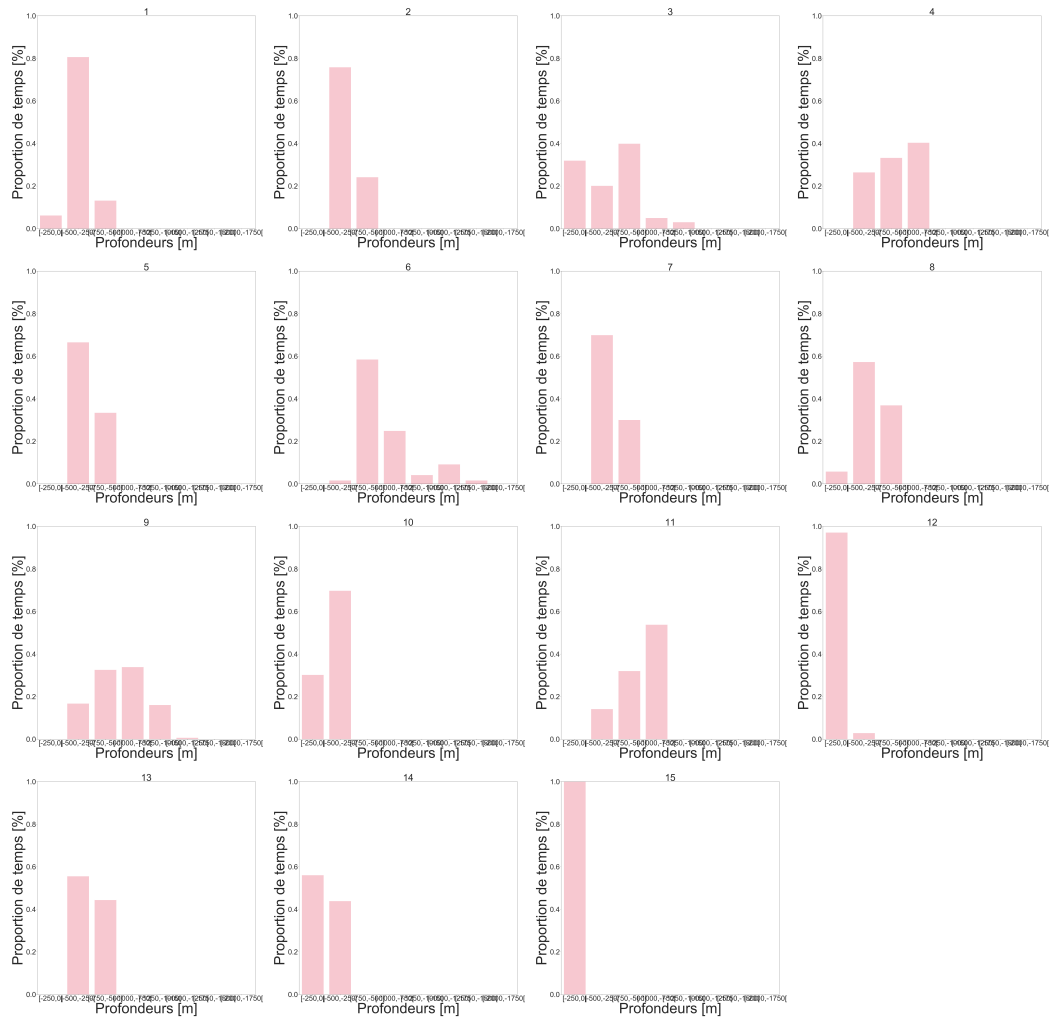


Figure 4.19: Proportion de temps passé à une profondeur donnée

On observe des pourcentages de temps plus importants aux profondeurs entre -500 et -250m de profondeurs. Cependant quelques pistes se trouvent entre -750 et -500m voir -1000 et -750m. La répartition du temps passé à chaque profondeur est globalement cohérente avec les estimations de densité de probabilité de la vitesse et du $\log(\text{ICI})$ en fonction de la profondeur (*i.e.* les profondeurs à fortes densités de probabilité sont bien celles où les Pm passent le plus de temps).

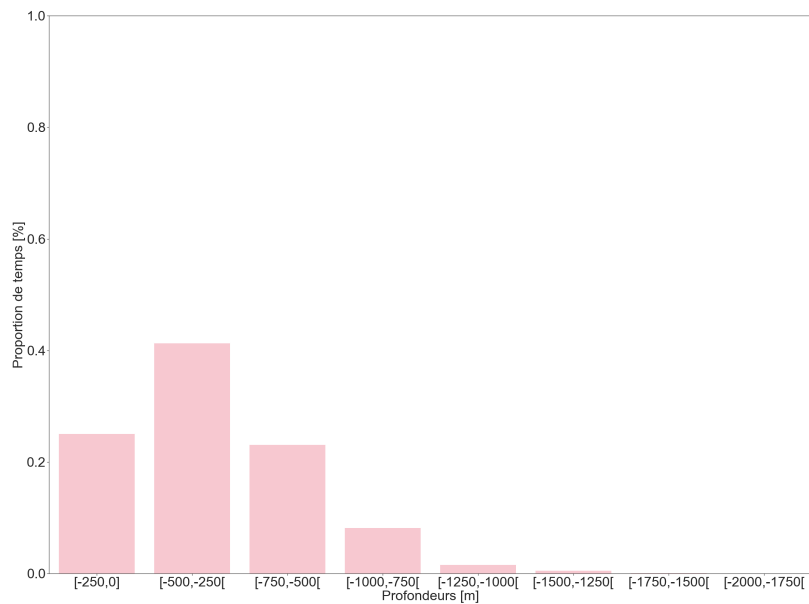


Figure 4.20: Proportion de temps passé à une profondeur donnée à l'échelle du groupe

A l'échelle du groupe, les Pm passent la majorité de leur temps entre -250m et -500m, ce qui est également cohérent avec les densités de probabilité estimées relativement à la profondeur.

4.6 TORTUOSITÉ

Pour plus de détails sur le calcul de la tortuosité et des vitesses respectivement, voir 3.2 et ??.

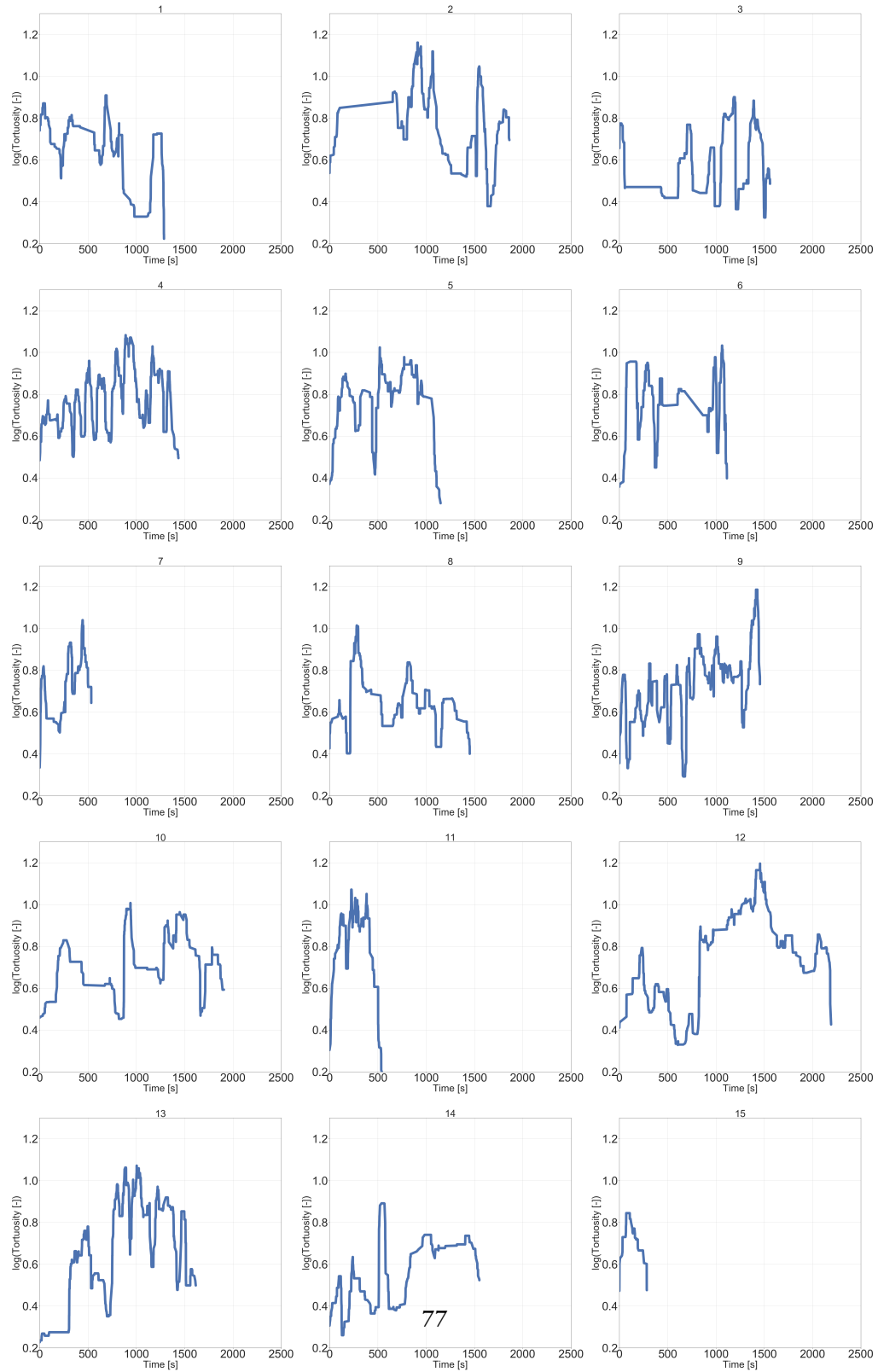


Figure 4.21: Logarithme de la tortuosité en fonction du temps

On observe bien une augmentation périodique de la tortuosité au cours du temps, avec en moyenne 3,93 pics/pistes (entre 1 et 6) où le logarithme de la tortuosité dépasse 1.

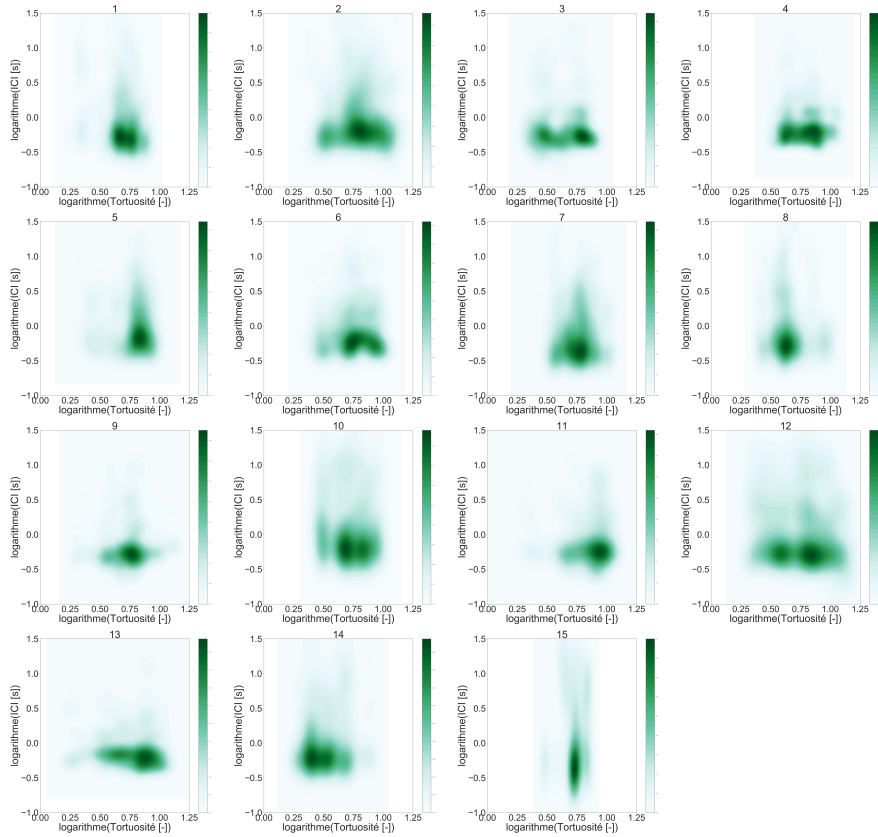


Figure 4.22: Logarithme de la tortuosité en fonction du logarithme de l'intervalle inter-clic

La densité de probabilité comporte un maxima important pour des valeurs de $\log(\text{ICI})$ entre 0 et -0,5 et plutôt centrée autour de $\log(\text{Tortuosité})=0.75$. On a cependant un étalement de la densité de probabilité selon le $\log(\text{Tortuosité})$, avec deux maxima

locaux à respectivement 0,5 et 1. On note aussi un étalement de moindre importance selon $\log(\text{ICI})$ pouvant monter autour de 0,5, mais pour des densités de probabilité relativement faibles.

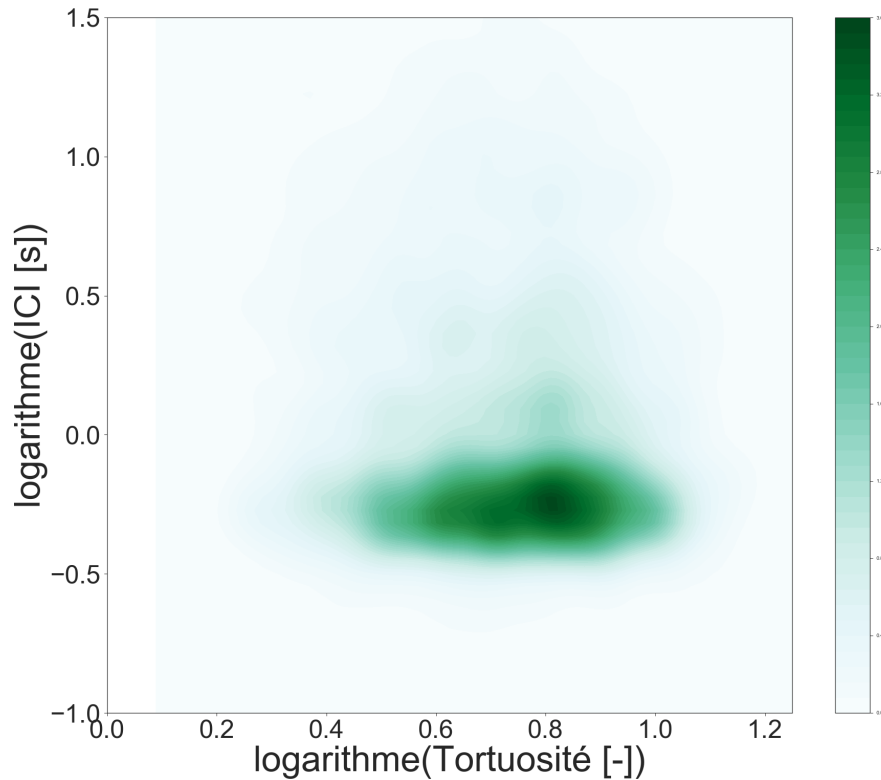


Figure 4.23: Logarithme de la tortuosité en fonction du logarithme de l'intervalle inter-clic à l'échelle du groupe

Le patron de la densité de probabilité ressemble à celui à l'échelle individuelle, si ce n'est qu'il n'y a quasiment pas d'étalement de la densité de probabilité selon $\log(\text{ICI})$, mais que celui selon $\logarithme(\text{Tortuosité})$ est plus prononcé, avec des valeurs de densité de probabilité plus importantes.

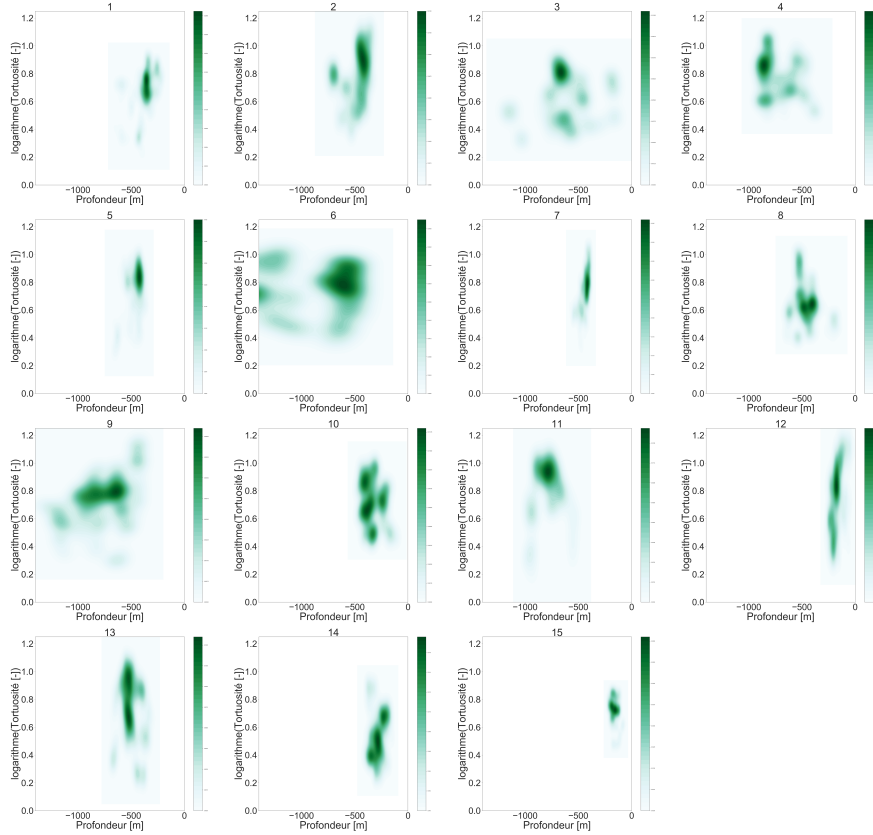


Figure 4.24: Logarithme de la tortuosité en fonction de la profondeur

La densité de probabilité est globalement à des profondeurs autour -500m, et descendant parfois jusqu'à -1000m. Les valeurs de profondeurs ne descendent en dessous de -1000m que pour deux individus. De plus la densité de probabilité couvre plus de valeurs au niveau du $\log(\text{Tortuosité})$, avec généralement plusieurs maxima pour des valeurs de $\log(\text{Tortuosité})$ entre 0,4 et 1,2.

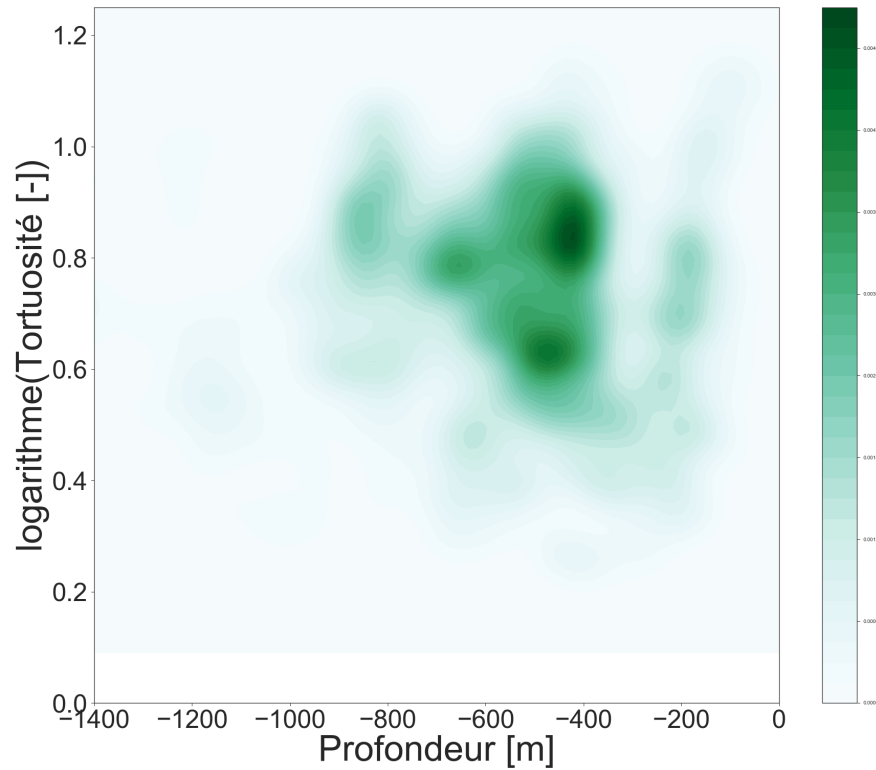


Figure 4.25: Logarithme de la tortuosité en fonction de la profondeur à l'échelle du groupe

Contrairement à l'échelle individuelle, on trouve plusieurs maxima de densité de probabilité, pour des profondeurs respectivement de -800, -600, -400 et -200m et des valeurs de $\log(\text{Tortuosité})$ entre 0,6 et 1. On retrouve deux maxima de densité de probabilité bien visible à une profondeur de -500m et pour des $\log(\text{Tortuosité})$ respectivement de 0,6 et 0,9, ainsi que trois autres maxima. Ceux ci correspondent à des profondeurs de -800, -600 et -200m respectivement et à des valeurs de $\log(\text{Tortuosité})$ de 0,8. Ces trois maxima sont un peu moins visible.

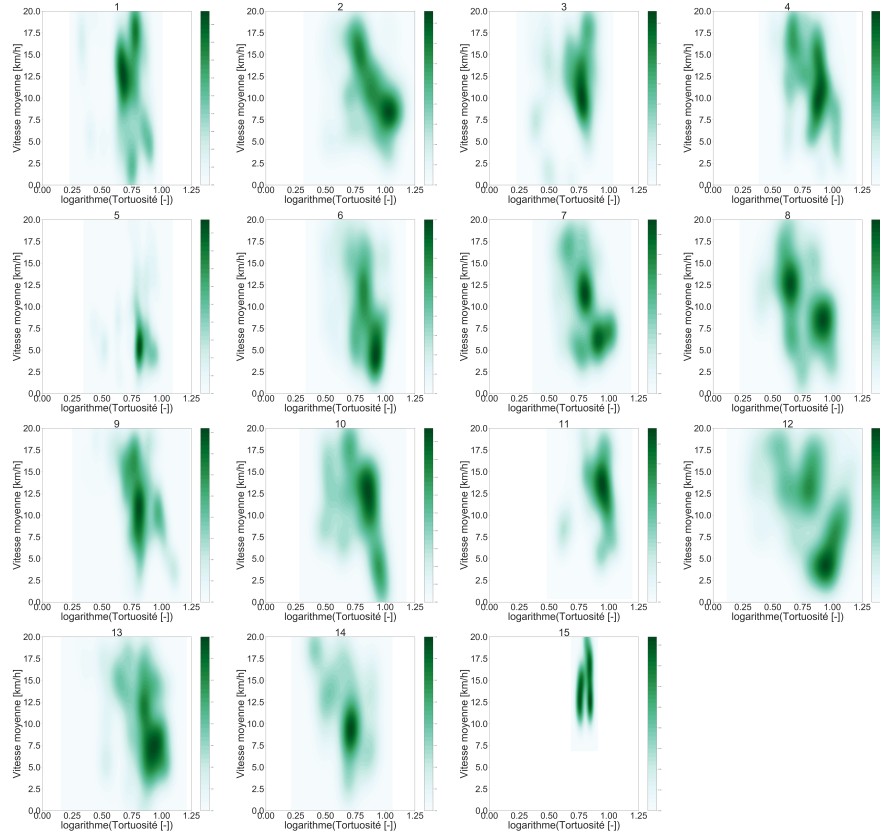


Figure 4.26: Vitesse moyenne en fonction du logarithme de la tortuosité

On observe que la densité de probabilité est très étalée le long de l'axe de la vitesse moyenne, et en revanche plutôt concentrée autour d'une valeur de $\log(\text{Tortuosité})=0,75$. On retrouve cependant sur plusieurs pistes maximum autour de $\log(\text{Tortuosité})=1$. Ces deux maxima de densité de probabilité, se situent respectivement au niveau de vitesses moyennes à 17,5 km/h et 5 km/h.

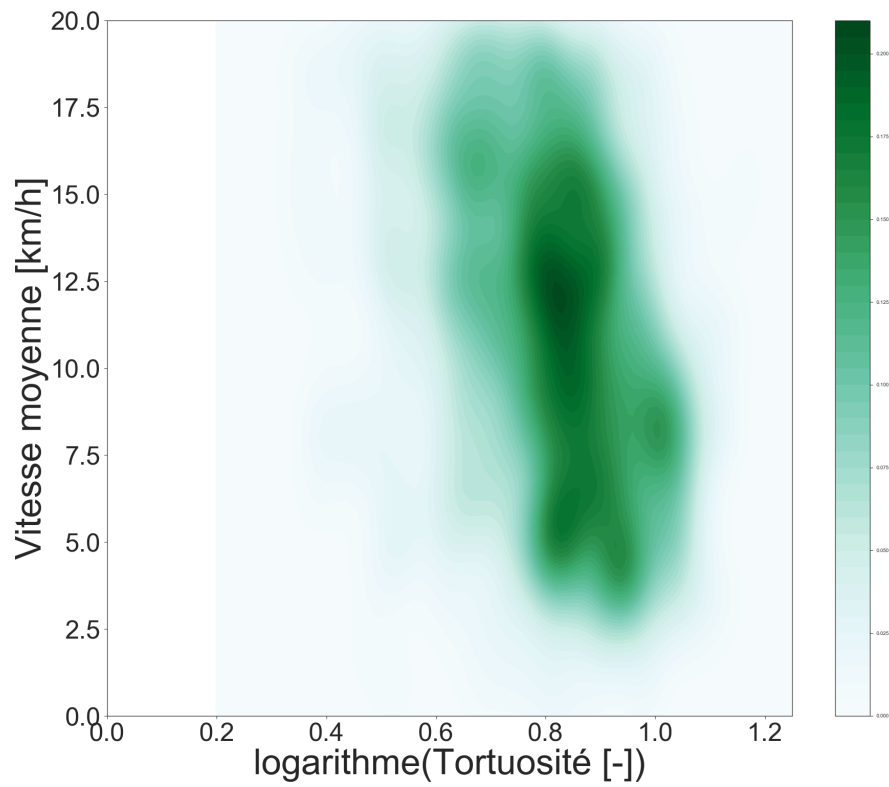


Figure 4.27: Vitesse moyenne en fonction du logarithme de la tortuosité à l'échelle du groupe

Le patron de la densité de probabilité est comparable à l'échelle individuelle avec une distinction moins importante entre les maxima.

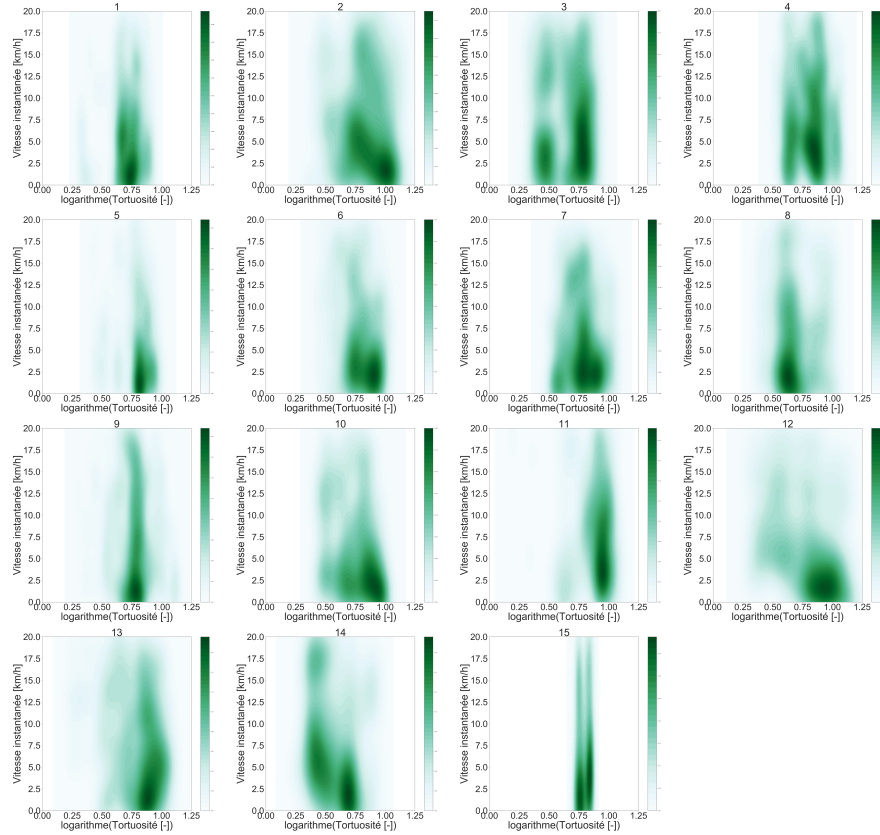


Figure 4.28: Vitesse instantanée en fonction du logarithme de la tortuosité

La densité de probabilité est très étalée au niveau des vitesses, de 2,5km/h à 17,5km/h, avec cependant un maximum plus important autour de 2,5km/h pour plusieurs pistes. Au niveau du logarithme(Tortuosité), deux maxima de densité de probabilité respectivement à des valeurs de 0,75 et 1 (et dans certains cas 0,5 et 0,75) sont bien visibles. Le maximum situés pour la valeur de log(Tortuosité la plus faible correspond généralement à une vitesse

plus élevée (7,5 km/h contre 2,5 km/h).

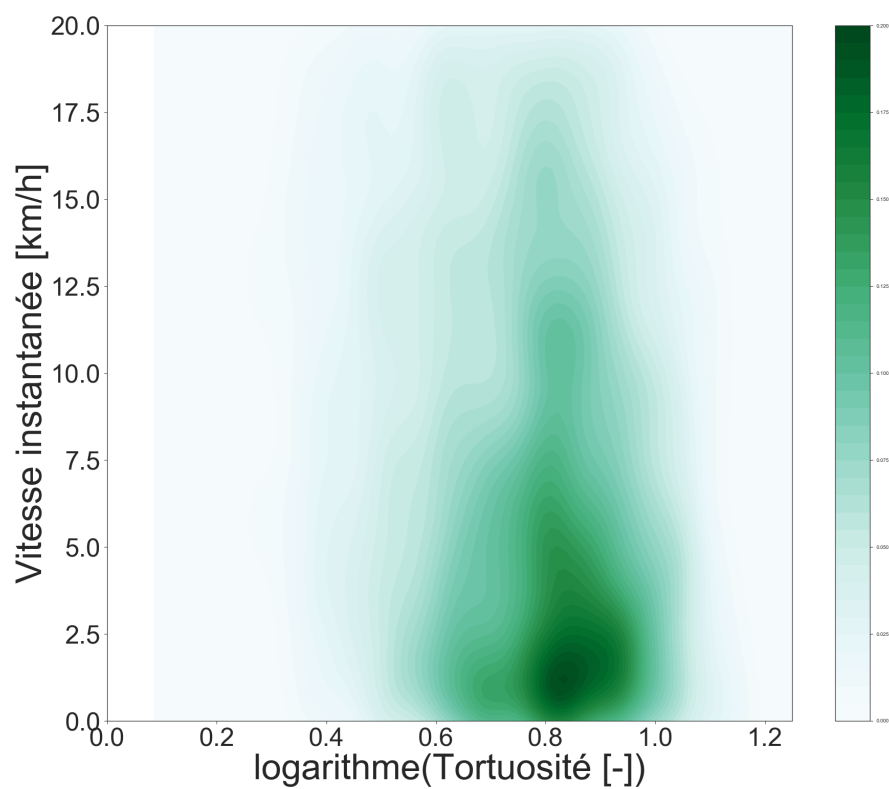


Figure 4.29: Vitesse instantanée en fonction du logarithme de la tortuosité à l'échelle du groupe

La densité de probabilité est légèrement plus concentrée vers les faibles vitesses par rapport à l'échelle individuelle, et ne possède qu'un seul maxima pour le $\log(\text{Tortuosité})=0,9$.

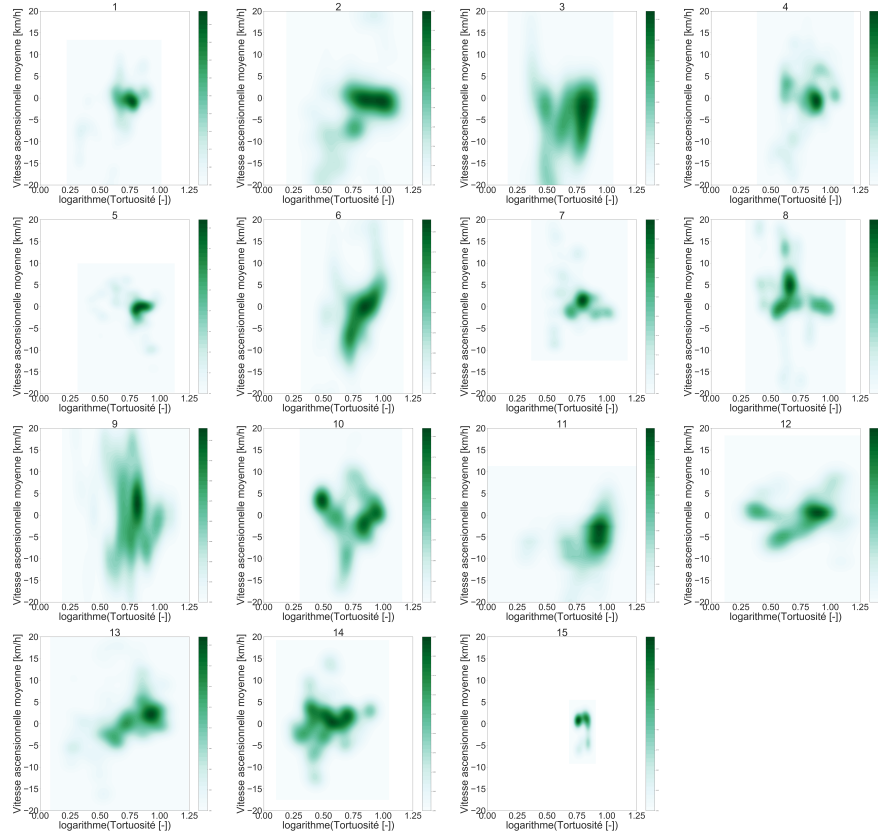


Figure 4.30: Vitesse ascensionnelle moyenne en fonction du logarithme de la tortuosité. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

La densité de probabilité est maximale pour des vitesses ascensionnelles moyennes nulles ou négatives (entre -5 km/h et -10 km/h) et pour des valeurs de $\log(\text{Tortuosité})$ entre 0,5 et 1. Pour quelques pistes, la densité de probabilité s'étale de 0,25 à 1 au niveau du $\log(\text{Tortuosité})$ et la vitesse ascensionnelle moyenne jusqu'à 15 km/h.

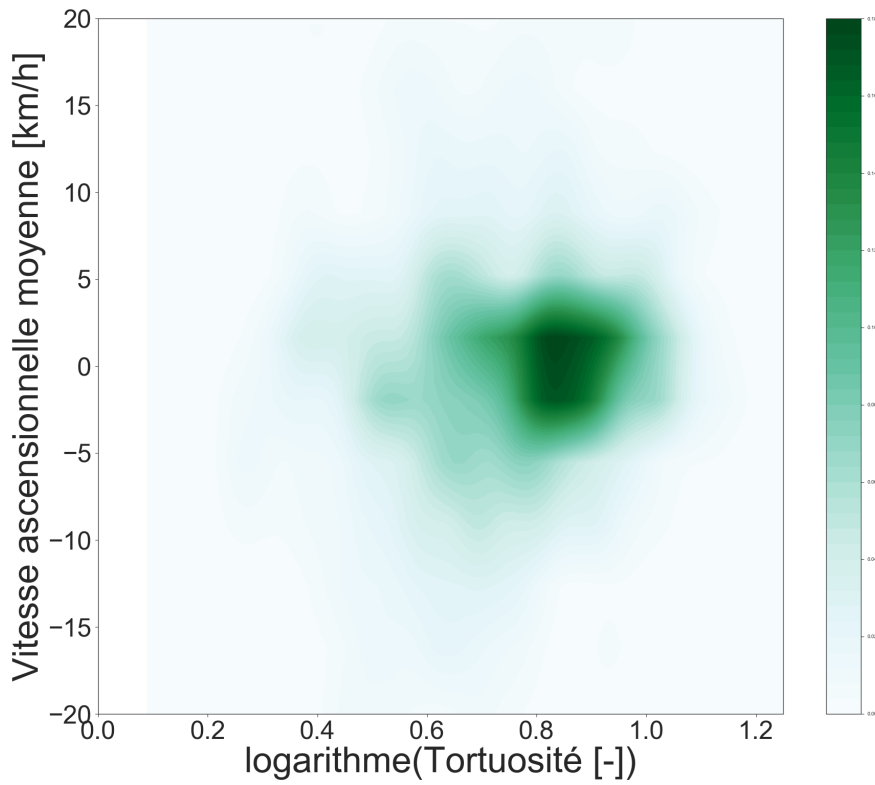


Figure 4.31: Vitesse ascensionnelle moyenne en fonction du logarithme de la tortuosité à l'échelle du groupe. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

Le patron de densité de probabilité est très concentrée autour de $v=0\text{ km/h}$, avec cependant un deuxième maximum de densité de probabilité pour des vitesses de -5 km/h . La densité de probabilité selon $\log(\text{Tortuosité})$ se situe entre 0,6 et 1.

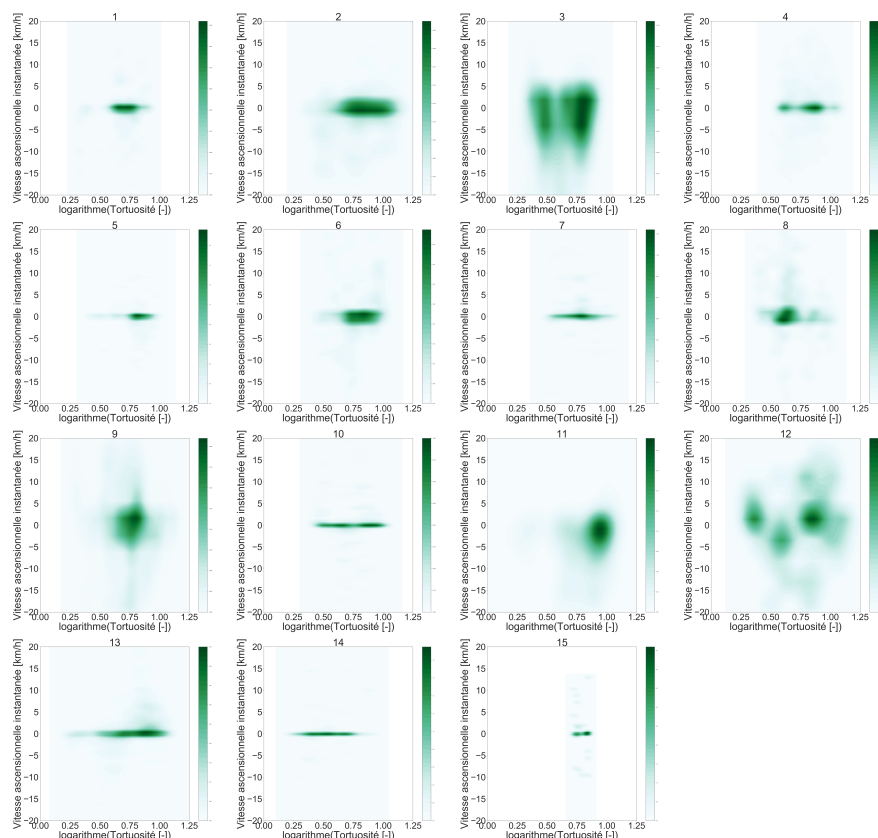


Figure 4.32: Vitesse ascensionnelle instantanée en fonction du logarithme de la tortuosité. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

On a une densité de probabilité montrant un patron vraiment très resserré au niveau d'une vitesse ascensionnelle instantanée égale à 0 km/h (excepté pour quelques pistes pour lesquelles les vitesses sont négatives, jusqu'à -10 km/h). Elle est, de plus, très étalée au niveau du $\log(\text{Tortuosité})$, allant de 0,25 à 1,25.

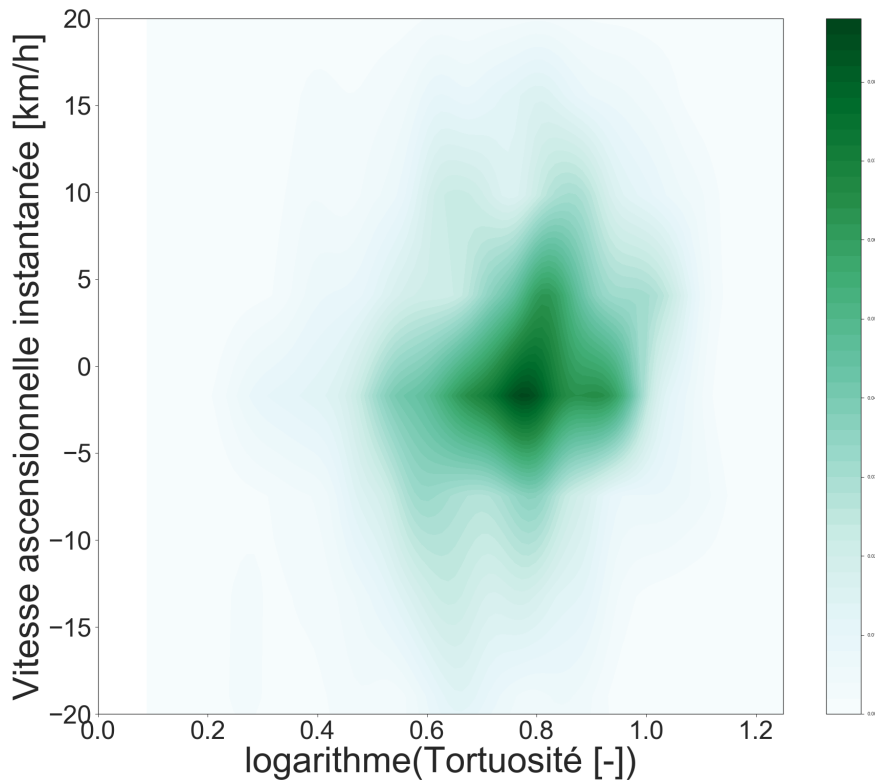


Figure 4.33: Vitesse ascensionnelle instantanée en fonction du logarithme de la tortuosité à l'échelle du groupe. Les vitesses négatives correspondent à des plongées et les positives à des remontées.

La densité de probabilité est un peu moins resserrée au niveau de la vitesse ascensionnelle instantanée (-7,5 à 7,5 km/h) et avec deux maxima correspondant à des $\log(\text{Tortuosité})$ de 0,8 et 1. On remarquera que la densité de probabilité est plus forte pour les vitesses positives (donc ascendantes) que négatives (donc descendantes).

4.7 DISCUSSION

Aux vues des précédents résultats obtenus avec ce système de traque (Poupard *et al.*, 2019⁴³), nous nous attendons à voir une corrélation entre la profondeur et l'intervalle inter-clic (ICI), dénotant d'une augmentation du comportement de chasse (caractérisé par un faible ICI) en profondeur. Les données obtenues ici ne semblent pas montrer une telle corrélation (Figure 4.9). En effet la densité de probabilité est maximale à deux profondeurs où l'on retrouve la même distribution d'intervalle inter-clic. On peut éventuellement remarquer que les ICI positifs (autour de 1) se retrouvent plutôt aux faibles profondeurs qu'aux profondeurs plus importantes. On notera également que les profondeurs enregistrées lors de la traque semblent toutes concerner la phase "bottom" de la plongée des cachalots, et n'englobe donc pas les phases de plongée puis de remontée vers la surface. Cela étant dit, si nous ne considérons que les profondeurs de chasse des *Pm*, il semble cohérent que nous n'observions pas de corrélation négative entre l'ICI et la profondeur.

On peut de plus, faire un parallèle entre cette relation et celles entre la profondeur et la vitesse moyenne, et la profondeur et la vitesse instantanée (Figures 4.1, 4.3). Les densités de probabilité y sont maximales pour les mêmes profondeurs. Autrement dit, on a toujours un maximum de densité de probabilité à une profondeur avoisinant les -600m, et quelques maxima secondaires autour de -800m ou -200m, pour l'ensemble de ces estimations. Les valeurs prises par les deux types de vitesse sont assez importantes, mais semblent présenter des maxima autour de 2,5 km/h et 17,5km/h. On a donc à ces profondeurs, des log(ICI) relativement faibles et des vitesses pouvant monter jusqu'à des valeurs importantes. La vitesse ascensionnelle est quant à elle reliée à la profondeur avec des vitesses nulles ou dans

un faible intervalle autour de 0 et située majoritairement à des profondeurs entre -400 et -600m (Figures 4.6, 4.5). Ces distributions sont plus resserrées pour la vitesse ascensionnelle instantanée que pour la vitesse ascensionnelle moyenne. Elles soulignent une fois encore la phase "bottom" de la plongée, *i.e.* la phase où l'animal termine sa plongée et reste à profondeur constante avant de remonter. Les *Pm* ont donc bien une phase de recherche de nourriture à profondeur constante.

Ainsi la distribution des vitesses en fonction de la profondeur semble montrer une profondeur principale privilégiée pour la chasse, et ce aussi bien à l'échelle individuelle que du groupe de *Pm*, ainsi que deux autres profondeurs un peu moins privilégiées. Il est à noter qu'on observe une certaine variabilité entre les individus, ce qui peut expliquer cette répartition autour de 3 profondeurs. Ceci pourrait être dû à une répartition des zones de chasse entre les différents individus en fonction de la profondeur. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse, par exemple en testant l'influence de la piste (*i.e.* du *Pm*) sur la profondeur la plus fréquentée. Il serait également utile de connaître la répartition des proies potentielles du *Pm* en fonction de la profondeur afin de comparer la profitabilité de la chasse entre ces profondeurs. Sans oublier que la densité de proie peut influencer le type de mouvements de recherche et de chasse. La comparaison de ces mouvements et vitesses avec la densité en proie à ces deux profondeurs serait donc un indicateur pertinent du comportement des *Pm*. Dans un dernier temps, l'analyse pourrait même être poussée jusqu'à prendre en compte le type de proie, qui correspond à un gain énergétique et un coût de chasse différent.

Au niveau de la relation entre le $\log(\text{ICI})$ et la vitesse instantanée, on observe une corrélation négative, avec les valeurs positives de $\log(\text{ICI})$ ne correspondant qu'à des vitesses faibles (Figure 4.13, 4.14). Ceci montre un comportement de chasse accru à forte vitesse, avec une vitesse moyenne de chasse autour de 20km/h, ce qui constitue une vitesse de pointe chez *Pm*. Ce résultat est cohérent avec la relation montrée par⁴³. Cette relation n'est en revanche pas visible au niveau des vitesses moyennes, concentrées principalement au niveau de $\log(\text{ICI})$ quasi-nuls (Figure 4.11, 4.12). Il est très probable que le fait de moyenner la vitesse ait gommé cet effet en ramenant les vitesses à des valeurs intermédiaires.

Les résultats sont plus contrastés au niveau des vitesses ascensionnelles. Les valeurs de vitesses ascensionnelles positives représentent les remontées et les négatives les plongées des *Pm*. La vitesse ascensionnelle instantanée montre des valeurs de densité de probabilité plutôt centrées autour de 0 et avec un étalement moyen entre -10 et 5km/h pour les plus grands, et plus marqué au niveau des vitesses négatives (Figure 4.15). La répartition de la densité de probabilité au niveau de $\log(\text{ICI})$ est en revanche plus étalée. On observe chez plusieurs individus, une birépartition, de la densité de probabilité autour de deux valeurs (respectivement négatives et positives) du $\log(\text{ICI})$ (le plus gros maximum de densité de probabilité se trouvant pour $\log(\text{ICI})=-0,5$). Cette birépartition des maxima de la densité de probabilité pointe encore une fois une corrélation négative entre le $\log(\text{ICI})$ et la vitesse. De plus, elle se retrouve aussi au niveau de la vitesse ascensionnelle moyenne (Figure 4.16. Au niveau global, on observe même 4 maxima de densité de probabilité pour la vitesse ascensionnelle moyenne (Figure 4.18) : Deux pour des vitesses différentes à un $\log(\text{ICI})=-0,5$ et deux autres pour une vitesse ascensionnelle quasi nulle et pour des $\log(\text{ICI})$ de 0,5 et 1. Ceci pointe deux comportements distincts, un comportement de chasse à faible ICI et forte

vitesse moyenne, et un comportement de dérive aussi bien à faible qu'à fort ICI et vitesse moyenne plus faible. Les valeurs positives de $\log(\text{ICI})$ ayant lieu à la fois aux profondeurs "de chasse" et aux autres profondeurs, on peut supposer qu'elles traduisent un comportement de "dérive", autrement dit, une plongée, une remontée ou une trajectoire "de fond" pendant laquelle l'animal ne cherche pas activement à se nourrir. De plus l'étalement des densités de probabilité selon les vitesses ascensionnelles négatives semble montrer une tendance des Pm à attaquer par le dessus.

D'autres études (Le Bras *et al.*, 2017⁴⁰) de traque en 3D ont montré une relation négative entre la tortuosité et la vitesse de chasse. Or, ici, il nous est difficile d'observer le lien entre ces deux caractéristiques : D'un côté, nous avons un $\log(\text{ICI})$ globalement constant en fonction de la tortuosité dans nos propres données et d'un autre une corrélation négative de l'ICI à la fois à la vitesse de nage et à la tortuosité montré par Poupard *et al.*⁴³ 2019. Cela nous fait premièrement nous questionner sur la relation entre la tortuosité et l'intervalle inter-clic. Il est possible que le lien observé par Poupard *et al.* soit dû à la structure du groupe de cachalots et les conditions de plongées acquises lors de leur étude, ou à la façon dont a été calculé leur indice de tortuosité. De plus nombreuses traques semblent nécessaires pour affirmer ou infirmer le lien entre ces grandeurs. Cependant, si on considère le lien montré par Poupard *et al.* comme significatif, cela signifie que les profondeurs de chasse correspondent alors à la fois à des mouvements rapides et tortueux, ce qui semble en désaccord avec les modèles présentés dans l'étude précédemment citée. Ceci pourrait s'expliquer par une trajectoire globalement linéaire, ce qui permettrait d'augmenter la vitesse comme la tortuosité du mouvement lors de la chasse sans que la première n'empêche la seconde.

En ce qui concerne le temps passé à chaque profondeur, excepté pour la piste 15, qui reste exclusivement en surface, on observe que la majorité du temps passé est en profondeur, entre -750 et -250m (Figures 4.19 et 4.20). La répartition du temps est relativement homogène entre ces différentes profondeurs. Cette répartition pourrait s'expliquer par une alternance de phases de chasse active et des phases de dérive.

On peut observer en moyenne 2,8 pics de par individus durant la plongée des *Pm*. On peut considérer ces pics comme correspondant aux périodes de chasse des *Pm* en se basant sur la corrélation entre tortuosité et ICI montrée par Poupard *et al.*⁴³. De plus la tortuosité varie beaucoup sur des profondeurs très réduites. Elle prend des valeurs de $\log(\text{Tortuosité})$ allant de 0,5 à 1,5 sur une profondeur plutôt autour de -500m (Figure 4.24). De plus elle est globalement constante par rapport aux vitesses moyennes et instantanées (Figures 4.26, 4.28). Elle prend des valeurs allant de 0,5 à 1,5 pour des vitesses de 0 à 17,5 km/h. En revanche, l'évolution de la tortuosité en fonction de la vitesse ascensionnelle (particulièrement la vitesse ascensionnelle instantanée), a des valeurs de vitesses nulles associées à une large gamme de valeurs de tortuosité (Figures 4.30, 4.32). Ceci peut s'expliquer par l'alternance de phases de chasse et de dérive de la "bottom phase" où les *Pm* ne se déplacent pas ou quasiment pas selon l'axe verticale. En supposant que les faibles tortuosités correspondent aux phases de dérives et les fortes aux phases de chasse comme montré par Poupard *et al.* (2019)⁴³.