

## Mise en évidence du sommeil d'une baleine dans les courants marins de Méditerranée nord-occidentale

Denise VIALE<sup>1</sup>, Laurent KOEHLIN<sup>2</sup> et Carli VIALE<sup>3</sup>

1. Laboratoire d'écologie des cétacés CNRS ; CEVAREN, Faculté des sciences. Université de Corse, avenue Jean Nicoli, 20250 Corte, France.
  2. Institut de recherches en astrophysique et planétologie (IRAP). Université de Toulouse, CNRS, 14, avenue Édouard Belin, 31400 Toulouse, France.
  3. Laboratoire d'écologie, APEEM, Lavasina, 20222, Brando, France.
- Auteur pour la correspondance / Corresponding author : Denise Viale <[vialedenise@gmail.com](mailto:vialedenise@gmail.com)>.

Manuscrit reçu le 21/02/2020, accepté le 01/03/2021, mis en ligne le 10/05/2021

Résumé	<p>Une expérience (nommée Argocet) de suivi par Argos d'un Baleinoptère (Bp) réalisée en 1991 durant 42 jours (VIALE <i>et al.</i>, 1992), a fourni un tracé avec des boucles qui ressemble à celui des bouées dérivantes utilisées pour déceler les courants marins parce qu'elles cessent de faire des boucles « d'oscillation d'inertie » (MILLOT &amp; CRÉPON, 1981) due à la force de Coriolis, dès qu'elles flottent dans des courants. Notre tracé montrait des segments avec ou sans boucles, dont une série de cinq boucles pour cinq jours consécutifs, liées au coucher du soleil (PICHOD-VIALE <i>et al.</i>, 1993), d'où l'hypothèse d'un sommeil suggérée mais restée sans suite.</p> <p>En retraitant récemment ces données, nous avons calculé et cumulé tous les angles de rotation de la baleine, démontrant l'existence de 26 boucles pour 26 nuits dans un circuit de 41 nuits ; les 15 nuits restantes sont effectivement dans des courants et donc sans boucle, courants reconnus d'après les cartes marines ; de plus, dans le même créneau horaire que celui des 26 boucles, le Bp a une vitesse calculée différente de celle des autres segments de la journée ; ce qui distingue ses phases d'activité le jour de la phase d'inertie la nuit dans les courants. Un sommeil quotidien est donc prouvé pour les 41 jours (Viale <i>et al.</i>, 2019).</p> <p>Nous entreprenons maintenant de prouver que la baleine marquée est bien dans les courants désignés ou dans d'autres masses d'eau circulantes, non cartographiées et qu'elle y dort. Nous avons calculé pour chaque segment joignant deux localisations consécutives, la longueur, la durée et la vitesse ; pour les 5 à 10 segments du parcours par jour, nous proposons ici la comparaison détaillée de ces vitesses calculées avec la vitesse du courant telle que fournie par une carte marine contemporaine de notre expérience.</p> <p>Nous montrons finalement que la baleine ne dort que de 1 à 2 heures après le coucher de soleil jusqu'à 1 à 2 heures avant le lever du soleil, qu'elle soit ou non dans des eaux circulantes ; en dehors de ce créneau elle est en activité.</p>
Mots-clés	Sommeil, baleine, balise Argos, courants méditerranéens.

Titre anglais : **Sleep-Cycle of a Fin Whale in north-west Mediterranean currents**

Abstract	<p>We tracked a fin whale in the Mediterranean sea over 42 days in 1991, using an emitter attached to the animal and the Argos satellite system. The track of the fin whale presents curls resembling those of the drifting buoys that are used to study the marine currents. Such loops are caused by the Coriolis effect due to the Earth's rotation, and concern all floating inert objects on the sea surface.</p> <p>In the track of the whale that we recorded in 1991, we initially detected 5 loops in 41 days of data, and those 5 loops could not be clearly interpreted. However, they opened the possibility that these "phases of inertia" could be sleep periods (VIALE <i>et al.</i>, 1992 ; PICHOD-VIALE <i>et al.</i>, 1993).</p> <p>By a recent reprocessing of the 1991 data, we evidenced a total of 26 loops in the fin whale's track, 21 of which had not been detected in the initial study. All these loops are drawn in the clockwise direction, as a consequence of the Coriolis</p>
----------	--

effect and Earth's rotation. Specifically for the whale track, the time and duration of these loops have a relation to the day-night cycle; they appear to occur during the night.

These phases of inertia do not appear as loops when the whale is in an identified marine current; there are 15 other nights in the track where the fin whale was drifting in marine currents. During those nights the track featured no loops, as the current drift combined with the Coriolis loops turned them into a cycloid-like curve, which in turn was displayed as a broken line joining the sampling points in the Argos data. Due to the sampling rate of the Argos system in 1991, which was quite sparse by today's standards, our whale track features only 6 to 10 segments each day.

We interpret the loops in the fin whale's track as periods of rest; the whale remains motionless relative to the water mass within which it rests. These periods called "phases of inertia" led us to propose the existence of a sleep cycle for the fin whale (VIALE *et al.*, 2019).

To study the loops, we measured the angles between consecutive track segments and computed their algebraic sum as a function of time. This, associated to the time, date, speed, and length of each track segment allowed us to estimate the time and duration of the loop phases of the fin whale.

In 1991, when the data were acquired, the Argos system comprised only two satellites and there were none above the horizon between 20:30 and 01:50 every night. During this 5-6 hour hiatus there is only one track segment. By computing the average speed in that segment we can deduce if the segment speed corresponds to that of the local marine current (known from other sources), in which case the whale is in total inertia, hence that it is sleeping. On the other hand, in the segments of the whale track before and after the hiatus, the speed appears to be quite different from the local sea current speed, we deduce that outside of the hiatus period, the whale is not sleeping.

Our study shows that the whale starts sleeping one or two hours after sunset, and sleeps until one or two hours before sunrise.

**Keywords** Sleep-cycle, Fin Whale, ARGOS PTT, Mediterranean currents.

## Introduction

Un baleinoptère (*Balaenoptera physalus*) (noté Bp ci-dessous), équipé d'une balise ARGOS a été suivi pendant 42 jours dans la partie nord de la Méditerranée occidentale entre la Corse et la Catalogne. Pourquoi avoir conçu cette expérience ? Le système ARGOS fournissait pour la première fois, dans les années 1980, un moyen de suivre un grand cétacé pendant plusieurs mois et donc de suivre sa migration éventuelle. Les cétologues méditerranéens étaient partagés sur le problème des migrations ; la majorité d'entre eux, observant des Rorquals été comme hiver en Méditerranée optaient pour une seule population permanente. Notre hypothèse était : la population d'hiver appartient au stock d'Atlantique Nord (JONSGARD, 1966) ; celle d'été à celui d'Atlantique Sud (VIALE, 1985). Avant d'être décimée, cette espèce de baleinoptère utilisait alternativement la Méditerranée occidentale l'hiver comme aire de parturition (breeding grounds) et l'été comme aire de nutrition (feeding grounds). Les allers et retours de baleinoptères dans le détroit de Gibraltar étaient donc suffisamment nombreux pour attiser l'appétit des baleiniers qui ont installé une exploitation en amont du Déroit (maintenue jusqu'à la deuxième guerre mondiale).

Il fallait donc assurer un suivi de plusieurs mois en posant une balise en début d'automne, avec les ressources en énergie suffisantes pour trois mois au moins ; le volume et le poids de la balise limitaient les prétentions. La construction de plusieurs prototypes a été nécessaire, avant d'obtenir la balise posée qui pesait 1,8 kg.

L'accrochage de la balise sur le Bp et la technique d'approche du Bp ont été les plus grosses difficultés, résolues par Carli Viale et ses collaborateurs de l'équipe technique, sur plusieurs années, à raison d'une ou deux attributions d'un navire océanographique (N.O.) du CNRS par an. Trouver un Bp en pleine mer, dans le créneau horaire de disponibilité de l'équipage, n'a été possible qu'avec les données acquises au cours des campagnes antérieures sur N.O. du

CNRS attribuées à D. VIALE et ses étudiants (DEA et DESS) de 1981 à 1991. Afin d'élargir notre champ d'observation des Cétacés et du Rorqual en particulier, nous avons également utilisé des valorisations de transit des navires de l'Ifremer qui passaient par Gibraltar.

La Balise ARGOS a été accrochée à une baleine d'environ 20 m, le 22/09/1991 et a été suivie sur nos écrans d'ordinateur jusqu'au 02/11/1991 (VIALE *et al.*, 1992, PICHOD-VIALE 1993, VIALE *et al.* 1996 ; MOUILLOT & VIALE, 2001). L'expérience a donc échoué puisqu'elle n'a duré que 42 jours au lieu de trois mois. Nous n'avons pas pu savoir si ce Bp sort de Méditerranée, mais cette expérience nous laissait la preuve qu'il trace des Boucles en forme d'alpha identifiées par Millot (com. pers) à celles tracées par les bouées dérivantes, équipées d'émetteur Argos, utilisées pour déterminer les courants (MILLOT & CREPON, 1981, MILLOT, 1987). Ce Bp suivi montrait donc des phases de flottaison en surface et en inertie, après le coucher du soleil, répétées dans le même créneau horaire, pendant cinq jours de suite. L'hypothèse d'une phase de sommeil était née... restée sans suite.

Avec des méthodes et moyens actuels nous avons mis en évidence 26 boucles (schémas 1 et 2), traduisant une phase d'inertie pour 26 jours de suivi dans des masses d'eau calmes ; pour les 15 jours de suivi restants pour lesquels la baleine se trouve dans des courants connus, sa trajectoire s'identifie à celles des bouées inertes dérivantes formant des cycloïdes (devenant des lignes brisées lorsque sous-échantillonnées). Elle y a donc aussi la même phase d'inertie. Un sommeil quotidien est donc démontré (VIALE *et al.*, 2019).

Un prolongement d'étude des données est entrepris ici pour situer la part de sommeil et celle de l'activité du Bp, chaque jour dans les courants marins ; il a montré la richesse d'informations éthologiques contenues dans la liste des longueurs / durées / vitesses / nombres de messages pour chaque segment joignant deux localisations, en dépit du maillage grossier de l'échantillonnage fourni par Argos

à cette époque, comparé à ce qui serait obtenu avec des moyens satellitaires actuels.

## Matériel et méthode

La baleine marquée est en fait un baleinoptère (*Balaenoptera physalus* Linné 1758) appelé Rorqual commun en Français et Fin Whale en anglais, caractérisé par sa nageoire dorsale (dorsal-fin en anglais) en éperon étroit.

### L'expérience initiale Argocet

La technique et le matériel ont été décrits en détail dans VIALE *et al.*, 1992 ; MOUILLOT & VIALE, 2001. Nous les récapitulons ici (Photos 1 à 4 et Fig. 1). Nous joignons la



**Photo 1**

Le navire « Catherine Laurence » stoppé pendant l'opération de marquage : chercheurs et marins, tous mobilisés sur le pont pour guetter l'émergence de la baleine repérée quelques minutes avant et l'indiquer au canot (cliché J. Roquefère).

*"Catherine Laurence" oceanographic ship at rest in the Mediterranean sea; the staff is watching for the whale's next surfacing, ready to tell its position to a team in a small Zodiac boat near by. Once spotted and approached by the team in the Zodiac, the whale will be "marked" (photo J. Roquefère).*



**Photo 2**

Photo prise antérieurement (1990) à partir du navire océanographique (N.O.) montrant la nécessité de positionner le canot pneumatique parallèle à la baleine émergée quelques secondes avant de sonder à nouveau (Cliché C. Moriaz).

*Photo taken previously (1990) from the oceanographic ship, showing how the marking of the whale (*Balaenoptera physalus*, abbreviated as Bp in the text) requires a close approach and parallel positioning (photo C. Moriaz).*

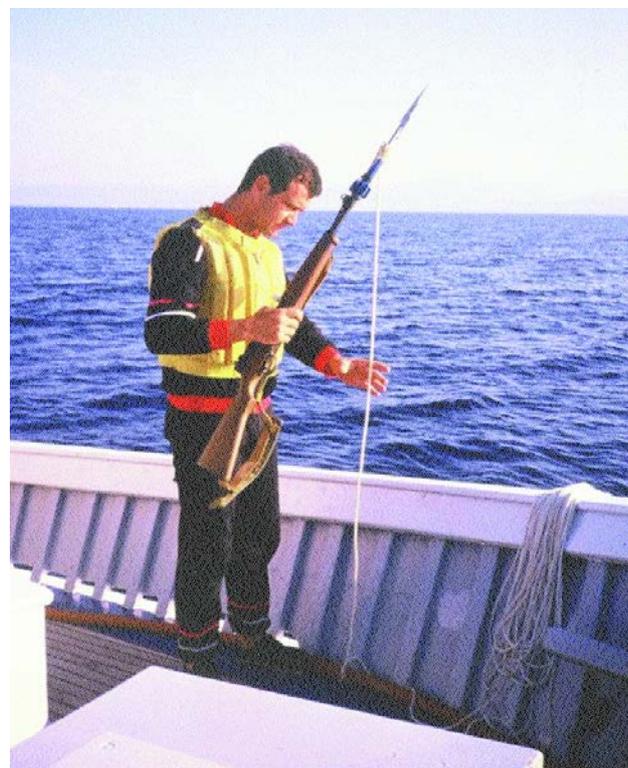
forme après traitements informatiques récents (Schémas 1 et 2, Fig. 2 et 3). Nous répétons donc ces explications dans les différentes publications qui en sont issues.

Les moyens à la mer sont les Navires Océanographiques (N.O.) du CNRS : ici, le « Catherine Laurence » et des canots pneumatiques à moteur loués (Université et Région de Corse).

La Balise Argos est un habitacle en fibres de carbone recouvert d'une peau de polyuréthane, logeant l'émetteur de CEIS-espace, une antenne originale conçue en hélice, un manomètre, le stock de piles au lithium et un matériel de remplissage en billes plastiques assurant le coefficient de flottaison et la résistance à la pression. Un filin de kevlar de 12 m unit la balise au Bp. Une difficulté de notre expérience était de maintenir la balise et son filin solidement attachés sur le canot pneumatique compte tenu des manœuvres rapides, brutalement changeantes imposées par le Bp poursuivi (Photo 2) sans entraver la libération de la balise à l'instant où le marquage est réussi : le Bp déclenche lui-même un système sécurisé mis au point par notre équipe (Photo 4).

L'accrochage du filin sur la nageoire dorsale est obtenu par un harpon propulsé par une arme militaire aux mains d'un Maître d'armes de l'Armée de Terre (Photo 3).

La modification expérimentale d'un fusil MAS a été assurée par les MM. Patrick Braconnier et Maurice Fenouillère ; la charge a été expérimentée à terre, pour obtenir la puissance nécessaire à faire pénétrer le harpon dans la nageoire dorsale du Bp ; cinq harpons seront successivement tordus sans pénétrer dans l'aileron, nous obligeant à



**Photo 3**

Rentré à bord du N.O. après opération, le maître d'armes détache le ceinturon de sécurité qui le reliait à son arme (le tir se fait à la hanche) et vérifie son harpon accroché au filin. *Back aboard the oceanographic ship, the "whale marker" unhooks the safety belt and verifies the harpoon linked to the line.*

augmenter la rigidité donc la solidité du harpon finalement fait en alliage d'acier au tungstène.

La difficulté de notre expérience était de maintenir la balise et son filin solidement attachés sur le canot pneumatique sans entraver la libération brutale de la balise à l'instant où le marquage est réussi ni mettre en danger les hommes sur le canot (Photo 4).

Les satellites utilisés sont NOAA H et D : ils passent chacun 2 fois par jour sur la zone du Bp, mais ne le perçoivent que s'ils sont assez hauts au-dessus de son horizon. D'où l'absence de messages de 5 à 6 h ; 10 à 12 h ; 15h30 à 16h30 ; 20h50 à 1h30. Ce dernier intervalle est nommé « Hiatus » dans le tableau 1.

Le signal émis par la balise, à la fréquence imposée par ARGOS, doit respecter des conditions strictes pour devenir un message de localisation de la baleine : émettre 3 séries de 4 secondes séparées par 15 secondes de « silence » ; sinon le message note seulement sa présence en surface à l'heure indiquée, sans la localiser.

Recueil des données par le Centre de Localisation par Satellites CLS Argos : 2 à 12 messages de localisation par jour émis par le Bp ont été reçus par les satellites et recueillis au Centre de localisation par satellites à Toulouse qui nous les a transmis par ordinateur. Nous avons pu suivre sur nos écrans, au laboratoire d'écologie (CEVAREN,



**Photo 4**

Intérêt historique de cette photo du canot avant le marquage réussi : la balise jaune (prototype 4, de poids 1,8 kg) est fixée solidement à la plateforme et reliée au déclencheur situé dans le cylindre gris, à droite ; le cylindre à gauche contient le filin lové soigneusement, dont le technicien est en train d'attacher le bout sur le harpon du fusil ; le tireur est en position, lié au fusil par un ceinturon (obligation militaire de sécurité) ; le tir se fait à la hanche. (Cliché N.Terris)

*Taken just before the successful marking of a whale: the yellow buoy (prototype 4, weighing 1.8kg) is fastened to the platform and linked to the trigger in the grey cylinder on the right; The cylinder on the left contains the line, coiled inside. A technician is fixing one end of the line to the harpoon. (Photo N.Terris)*

Faculté des sciences, Université de Corse) la Baleine pendant son périple. Puis CLS nous a transmis les données brutes sur papier : elles comportaient six séries de zéros ; CLS alerté nous a transmis deux listages épurés et une synthèse graphique en 1992.

## Retraitement informatique des données anciennes

Les listages ont dû être scannés et renumérisés par OCR LK les a contrôlés pour éliminer les erreurs résiduelles de transcription et les a triées pour écarter les localisations de mauvaise qualité en utilisant à cette fin deux informations fournies pour chaque message Argos : la distance du satellite à la baleine à l'instant de la localisation, et la valeur du rapport Signal/bruit en dB. La précision de la localisation est mauvaise (souvent plus de 1 km d'erreur) quand le satellite est au Zénith de la baleine ou quand il est bas sur son horizon ; dans ce cas, le message de localisation est classé par CLS en classe Zéro. Au contraire, une localisation de bonne précision, de classe 3, est donnée à 150 m près.

## Méthodes

L.K a repris ces données en les transcrivant sur la surface de la Terre et traduit les coordonnées angulaires (longitude et latitude) fournies par Argos en distances linéaires sur la surface terrestre : distances en kilomètres respectivement par rapport au méridien de Greenwich et à l'équateur. Nous avons donc deux coordonnées  $(x_0, y_0)$  pour le premier point de localisation du Bp ; en joignant le point suivant  $(x_1, y_1)$  nous obtenons un segment décrit par 4 coordonnées :  $(x_0, y_0, x_1, y_1)$ , sa longueur  $l_1 = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]^{1/2}$ , et la vitesse moyenne sur le parcours de ce segment  $v_1 = l_1 / (t_1 - t_0)$ , et ainsi de suite pour tous les segments du parcours. Compte tenu de l'incertitude de 150 m sur les localisations  $(x, y)$  Argos, les vitesses du Bp calculées ont une précision de  $\pm 0,13$  km/h en moyenne.

Entre deux segments consécutifs, décrits par trois points :  $(x_0, y_0)$   $(x_1, y_1)$   $(x_2, y_2)$  nous mesurons l'angle  $\alpha$  de rotation de la trajectoire, voir schéma 1.

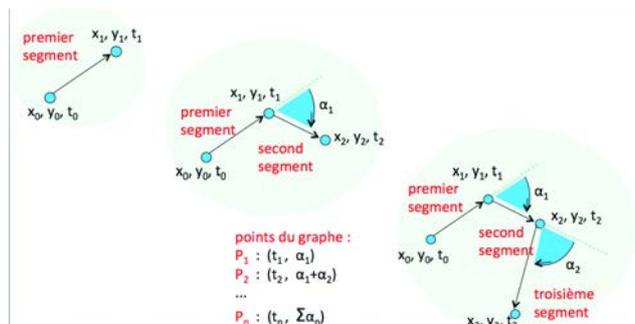
$\alpha_1 = \text{atan} [(y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)] - \text{atan} ((y_1 - y_0) / (x_1 - x_0))$  ; atan est la fonction arctangente signée.

Les angles sont comptés positivement ou négativement selon leur sens, nous les avons intégrés le long du parcours. On voit que leur cumul  $\sum \alpha_n$  est quasi strictement croissant, ce qui implique que la trajectoire « tourne » presque toujours dans le même sens, en boucles. Voir schéma 2. Nous en avons déduit les phases d'inertie, puis le cycle de sommeil détaillé dans VIALE, D., KOECHLIN, L. & VIALE, C., 2019.

Une autre difficulté avait bloqué l'utilisation des données initiales : l'ignorance de la durée exacte du jour et de la nuit. Il y a plus d'une heure de décalage de l'heure du coucher du soleil entre le début (17 h en septembre) et la fin (16 h en novembre) de notre suivi de la baleine.

La vitesse moyenne à laquelle le segment entre deux localisations a été parcouru ne dit pas la vitesse réelle à chaque instant du Bp mais nous renseigne tout de même sur son comportement probable lié à la forme et au nombre des messages reçus, au fonctionnement des écosystèmes et au rythme solaire.

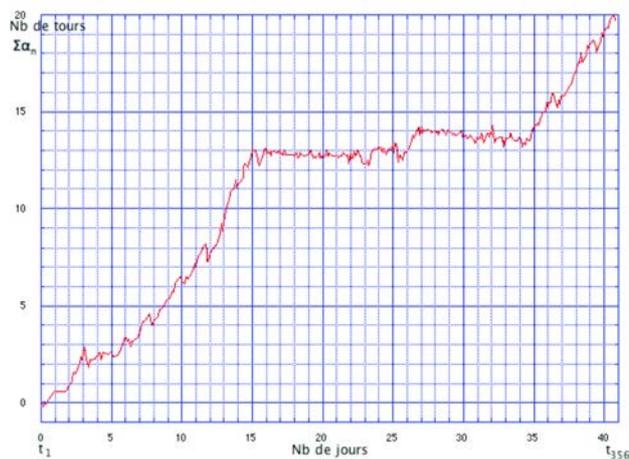
Notre objectif ici est de démontrer que le Bp marqué dort, quand il est dans un courant marin, avec la même durée de la phase d'inertie, dans le même créneau horaire,



**Schéma/Graph 1**

Les points de localisation Argos sur le trajet du Bp sont donnés par la position  $(x, y)$  et la datation  $(t)$ . Chaque couple de points Argos donne un segment de la trajectoire : comme le premier segment en haut à gauche du schéma. On mesure les angles  $\alpha$  entre deux segments consécutifs : exemple au centre du schéma. On intègre ensuite ces angles et on trace le graphe en fonction de  $t$  : illustration à droite et en bas du schéma.

*Each of the Argos trackpoints consists of three data: a position  $(x, y)$  and a time  $(t)$ . A pair of trackpoints yields a vector (segment of the trajectory), as shown in the upper left sketch. Two adjacent segments yield an angle, as in the middle sketch. A series of angles can be integrated, yielding the points of the following graph.*



**Schéma/Graph 2**

Graphe de la somme des angles entre segments de la trajectoire de la baleine :  $\sum \alpha_n$  en fonction du temps. La somme des angles est exprimée en nombre de tours ( $+360^\circ = 1$  tour sens horaire) et le temps est exprimé en jours depuis le début du suivi.  $t_1$  est la date du second point Argos de localisation,  $t_{356}$  est le dernier dans les données. Cette courbe montre que la baleine tourne quasi systématiquement dans le même sens ; on obtiendrait un graphe très différent si son parcours était aléatoire.

*Integrated angles in the whale's trajectory, as a function of time. Vertically: number of loops ( $+1$  loop =  $+360^\circ$ ). Horizontally: number of days since the beginning of the track (356 trackpoints in 40 days). This graph shows that the whale's track features mostly clockwise loops. (from VIALE, KOEHLIN & VIALE, 2019).*

que dans les masses d'eau non circulantes. Pour permettre la comparaison, il faut écarter la variabilité sur l'heure du début de la nuit, celle sur la durée de l'intervalle entre les 2 passages du satellite sur la zone d'étude et celle, individuelle de la baleine qui cesse son activité de plongée 1,5 à 2 heures avant le coucher du soleil, (quand et parce que le krill se disperse) et varie nettement son heure d'« endormissement » d'après notre enquête sur la variation de sa vitesse sur les segments antérieurs à 20h30. De 20h50 à 1h50 le lendemain, le satellite ne fournit aucune localisation de la baleine car il est trop bas sur son horizon et ne la perçoit pas ; dès lors, ce hiatus entre la dernière localisation fournie et la première du lendemain est un moment-échantillon quotidien de la vie du Bp la nuit, concordant avec le créneau horaire de la boucle décrite dans les masses d'eau non circulantes.

Nous localiserons la phase d'inertie là où la vitesse du Bp est égale à celle du courant, telle que fournie par les cartes nautiques.

En pratique, nous avons à comparer :

- la vitesse obtenue lors du dernier passage de satellite d'un jour donné, le 7 octobre, par exemple, qui nous donne la vitesse moyenne entre les points de localisation  $7_{n-1}$  et  $7_n$ , nommons cette vitesse  $7(n)$  ;
- avec la vitesse obtenue lors du premier passage de satellite du jour suivant 8 octobre, qui nous donne la vitesse moyenne entre les points  $7_n$  et  $8_1$ , nommons cette vitesse :  $8(1)$ . Même notation dans le Tableau 1.

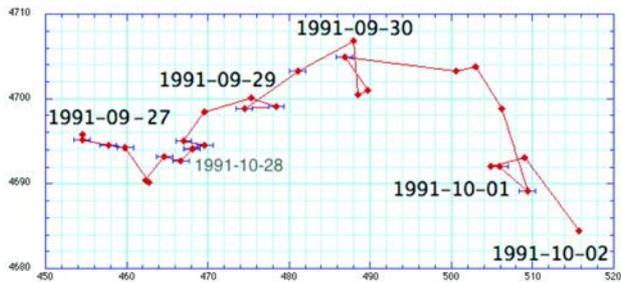
Cette dernière est comparée avec la vitesse fournie par la deuxième localisation pour savoir si l'activité du Bp a repris, et fixer la durée de la phase d'inertie. D'autre part, la vitesse indiquée par l'avant-dernière localisation  $(n-1)$  est utile pour savoir si la vitesse en activité a diminué avant 20h30 et diminue encore dans le créneau de temps 20h30-01h50. En effet, si la baleine est en inertie, mue uniquement par la force de Coriolis et le courant, sa vitesse doit devenir inférieure à celle qu'elle a en activité dans le courant. La vitesse indiquée par la deuxième localisation indique si la baleine est encore endormie ou déjà active : l'analyse montre qu'elle a presque toujours repris sa motricité dès 2h30.

## Résultats

La Figure 1 montre les premières boucles qui avaient été mises en évidence.

La Figure 2 est la trajectoire de la Baleine marquée d'une balise Argos superposée à la Carte Google-Earth de la Méditerranée Nord-occidentale (extrait de VIALE, KOEHLIN & VIALE, 2019). Cette figure montre clairement que le déplacement du cétacé ne se fait pas au hasard : il utilise la topographie du relief sous-marin et les courants permanents.

La Figure 3 est établie grâce au calcul de l'heure du lever et du coucher de soleil chaque jour ; ceci permet de comparer la longueur des segments du trajet de Bp, jour et nuit : chaque jour commence par un segment de nuit, puis les segments du jour, puis un segment de nuit du coucher de soleil à minuit.



**Figure 1**

Trois des boucles détectées initialement en 1991. Verticalement : km, origine équateur; horizontalement: km, origine méridien de Greenwich.

Three of the five loops initially detected in 1991. Vertically: km from equator; horizontally: km from Greenwich meridian. (from VIALE, KOEHLIN & VIALE, 2019).

Dans le Tableau 1, pour chaque segment entre deux localisations consécutives du Bp, ont été calculées la longueur, la durée et la vitesse du parcours ; leurs valeurs ont été reportées sur un tableau de travail dont nous avons extrait ici les chiffres concernant la partie de la trajectoire dans les courants.

### Les caractères des masses d'eau circulantes de Méditerranée Nord-Occidentale

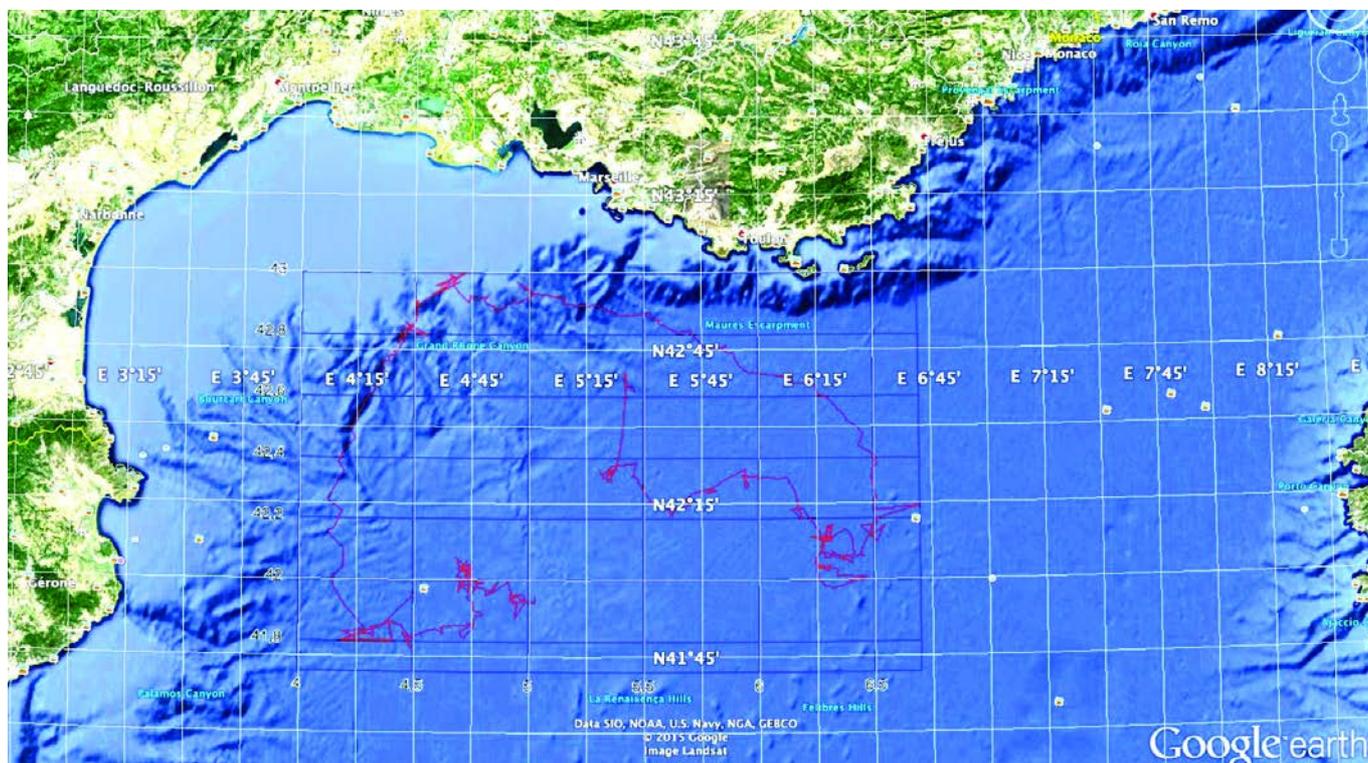
La circulation générale des courants est assez peu documentée : les nombreuses cartes nautiques du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) fournissent seulement la bathymétrie et la topographie côtière, comme la cartographie informatisée, dans le but d'aider la navigation de plaisance. Mais nous avons retrouvé

la « Carte des courants de surface en Méditerranée dans leur relation avec la météorologie », SHOM 1956, d'après une carte d'opérations de secours aéro-maritime éditée en 1955 par l'Aéronautique Militaire Italienne (« CARTA di NAUFRAGIO », échelle 1 :5.000.000). Cette carte a été contrôlée et déclarée « à jour le 11 mars 1994 EPSHOM » ; elle convient donc pour notre suivi de la baleine en 1991. Elle est présentée pro parte Figure 4A.

Cette carte nous a fourni des indications précieuses sur les vitesses des courants permanents et sur l'existence des courants temporaires, leur circuit et leurs fréquences relatives pour les quatre saisons en fonction des types de conditions météorologiques. Parmi les 14 exemples fournis en cartouches cartographiées de petit format autour d'une grande carte générale, avec leur fréquence annuelle par saison, nous en avons identifié deux qui expliquent l'existence du courant montant du Sud-Est, à partir de la pointe d'Alger (Sardaigne) à 41°, vers le Nord-Ouest au niveau de Toulon, comme celui emprunté par la Baleine marquée, et indiqués avec une fréquence de 40 % l'hiver et 22 % en automne Figure 4B.

En fait, la Mission Océanographique Internationale en Méditerranée Occidentale (Western Mediterranean Circulation Experiment WMCE) en juin 1986 n'a pas pu identifier un tel courant dans la partie au sud de 40° ; à la place une expatriation des vortex se fait en permanence dans la même direction.

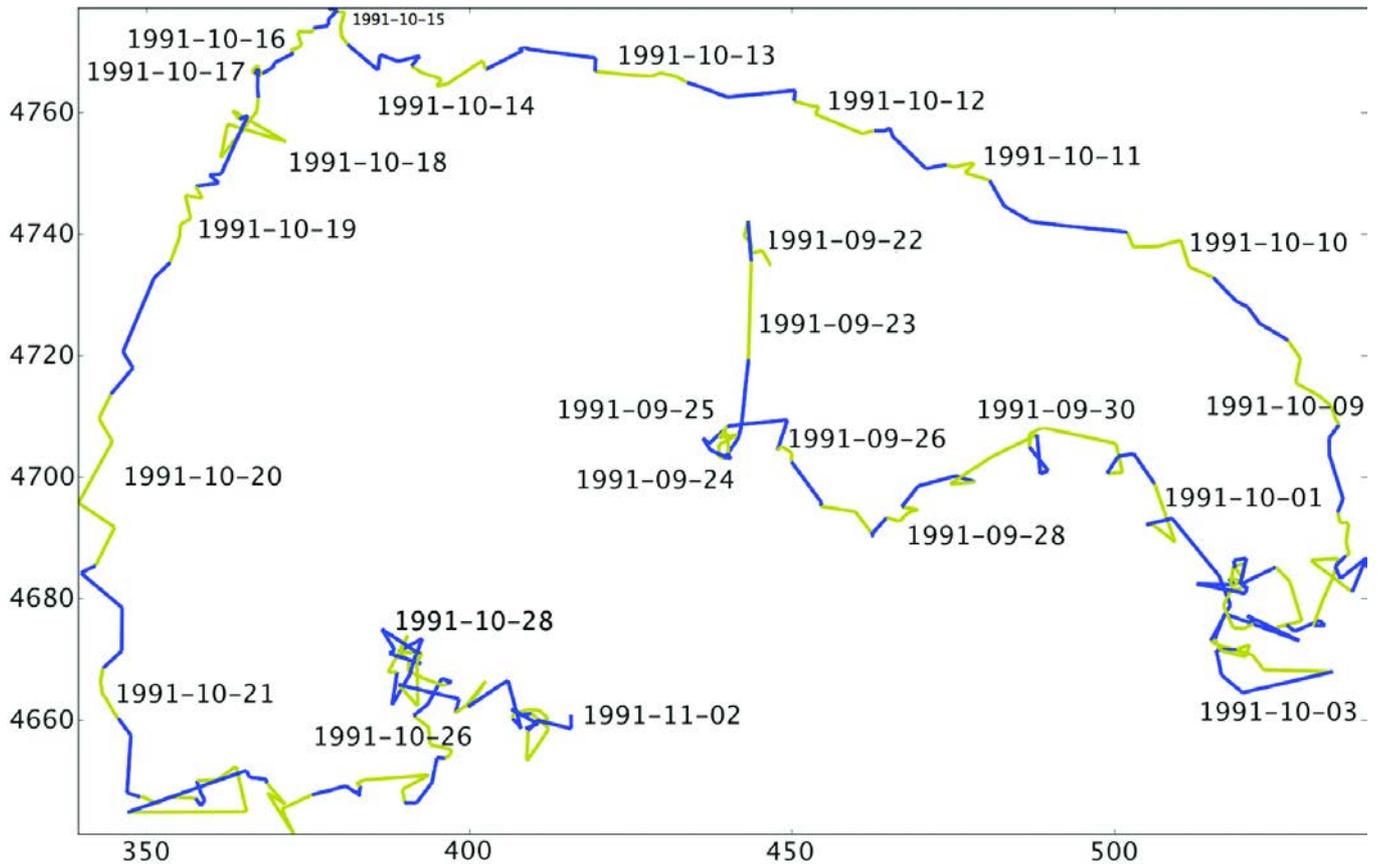
Les conditions hivernales déterminent des courants temporaires dans les masses d'eau internes par rapport au circuit elliptique du courant permanent Nord-Méditerranéen, mises en branle localement par des vents froids et puissants provenant du NE ou NW ; la saisonnalité agit sur la température, la force et la direction du vent ; les plus



**Figure 2**

Trajectoire de la Baleine marquée d'une balise Argos superposée à la Carte Google-Earth de la Méditerranée Nord-occidentale.

Argos track of the whale, superposed on to the Google-map of the North-Western Mediterranean sea (from VIALE, KOEHLIN & VIALE, 2019).



**Figure 3**

Alternance jour-nuit le long du trajet du Bp : entre points de localisation consécutifs le segment est bleu s'il démarre la nuit, brun olive s'il démarre le jour. Echelles en km, verticalement depuis l'équateur ; horizontalement depuis le méridien de Greenwich.

*Day-Night alternation in the whale's track: blue segments correspond to (start with) trackpoints at night, brown ones correspond to trackpoints during daytime. (from VIALE, KOEHLIN & VIALE, 2019)*

fréquents (Mistral, Tramontane) vont vers le Sud et déterminent la formation de « l'eau profonde Méditerranéenne ». La Carte des Naufrages indique un courant « de densité » vers le sud pendant le semestre d'hiver (mi-automne – mi-printemps), comme une branche du courant Nord-Méditerranéen se détachant au niveau de la jonction des tronçons ligure et provençal.

Les vitesses indiquées sur la Carte des naufrages ont été comparées à celles de récentes publications dont MILLOT, 1987 ; MILLOT & TAUPIER LETAGE, 2005 qui unifient sous l'appellation « courant Nord-Méditerranéen » les différents tronçons Ligure, Provençal, Catalan, avec une vitesse de « quelques dizaines de centimètres par seconde ». En fait, la vitesse de ce « courant de densité » permanent constitué d'eau atlantique (AW modifiée) peut varier localement en fonction de la proximité du plateau continental et des variations saisonnières climatiques : de 10 à 20 cm/s (0,36 à 0,7 km/h) l'été, 20 à 40 cm/s (0,7 à 1,5 km/h) l'hiver et même 40 à 60 cm/s (1,5 à 2,2 km/h) dans le Golfe du Lion (MILLOT, 1991).

Dans notre expérience, le Bp marqué utilise un courant vers le Nord, comme ce courant de densité en automne et hiver, figuré appartenant au Circuit Ibérique (Figure 4A) ; sa vitesse est de l'ordre de 0,8 à 0,9 km/h.

Au total, les valeurs des vitesses des courants utilisées par le Bp marqué sont donc :

– pour le courant Liguro-provençal : de 0,9 à 2,7 km/h ;

– pour le courant Catalan : de 0,9 à 1,8 km/h ;

– pour un courant temporaire : de 0,1 à 1,1 km/h ; (ici circuit Ibérique 0,8-0,9 km/h).

## Discussion

Dans la Figure 3, la partie du circuit de la baleine, réalisé dans des courants, constitue le tracé en ellipse, du 7 octobre, situé à l'angle inférieur droit de la figure, jusqu'au 22 octobre, situé à l'angle inférieur gauche. Il ne montre aucune boucle comme celles visibles sur le tracé tortueux, intérieur à l'ellipse.

La baleine marquée utilise d'après le tracé de sa trajectoire (Figures 2 et 3) :

– un courant temporaire du 7 octobre au matin au 10 octobre au soir ;

– le courant provençal : du 11 octobre au matin au 15 octobre après midi ;

– l'intermédiaire du Bp dans le Canyon les 15, 16 et 17 octobre ;

– le Courant Catalan : du 18 octobre au matin au 22 octobre au matin.

La carte en Figure 3 distingue en couleur olive les segments parcourus de jour des segments de nuit en bleu ; ces derniers varient peu en longueur pour tout le tracé ; au contraire la longueur des segments de jour varie fortement : du simple au double et plus. Les segments les plus grands

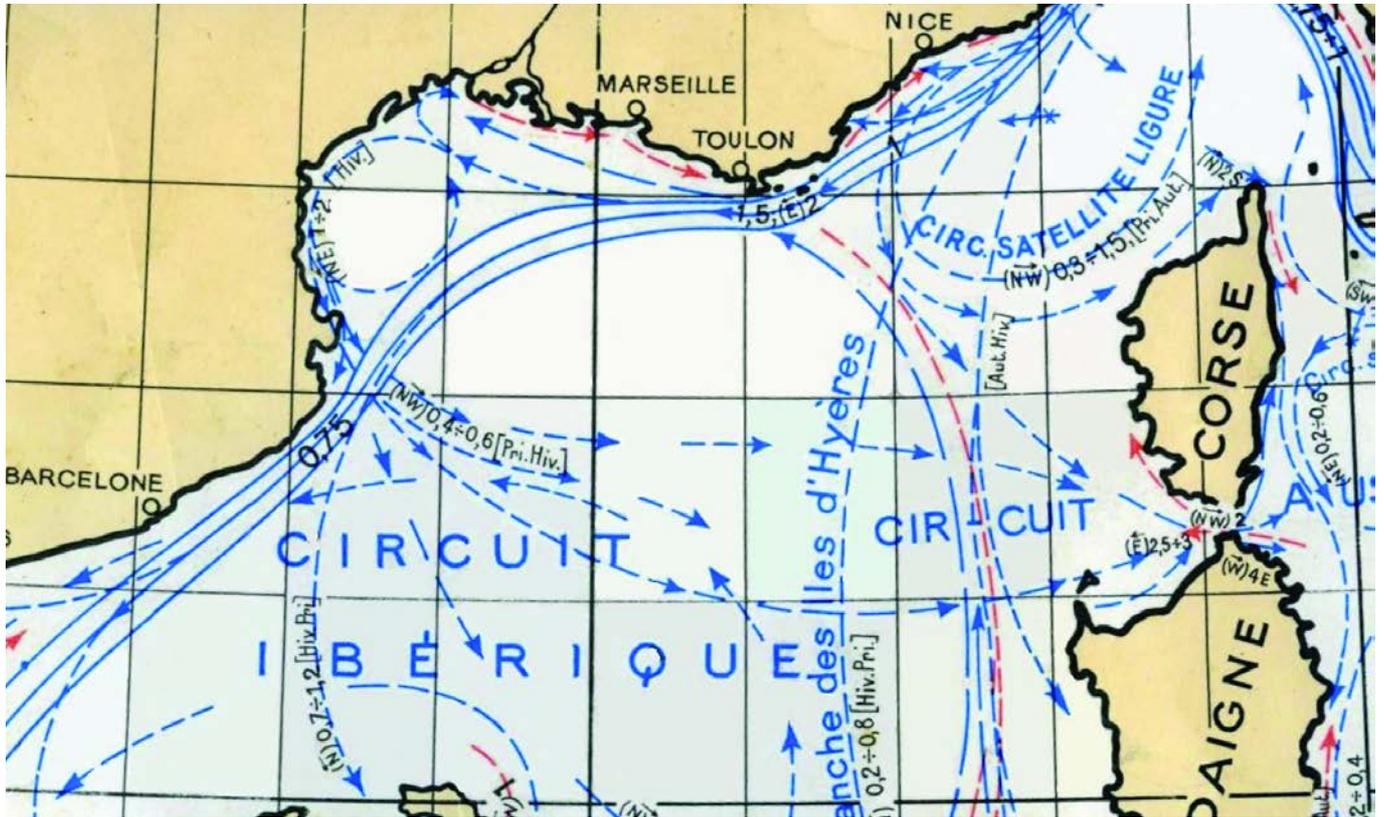


Figure 4A

Extrait de la Carte des courants marins en Méditerranée occidentale, éditée en 1955 par l'Aéronautique Militaire Italienne (« CARTA di NAUFRAGIO »). Cette carte a été contrôlée et déclarée « À jour le 11 Mars 1994 EPSHOM ». Détail de la zone au nord du 40ème parallèle et de 0 à 10 degrés Est, équivalente à la zone de la Figure 2 où a été située la trajectoire de la Baleine marquée.

Extract from a map of the currents in the western Mediterranean sea (CARTA di NAUFRAGIO, 1955, Italian Air Force). This map has been controlled and declared "up to date" in 1994 by EPSHOM (Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, the French Navy). The field is slightly larger than in fig. 2.

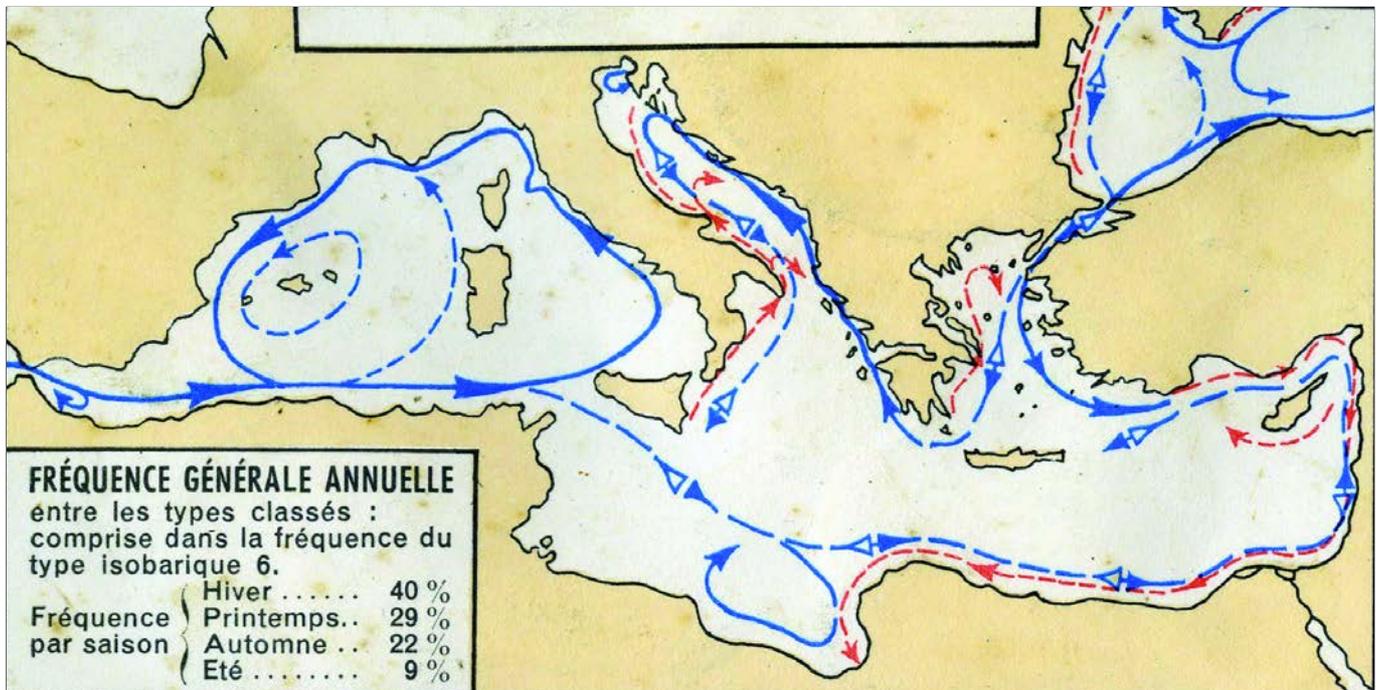


Figure 4B

L'eau Atlantique qui entre en Méditerranée en longeant la côte algérienne formerait occasionnellement une « branche montante dite Algéro-Provençale » représentée ici en tirets ; elle a été contestée dans sa partie Sud (WMCE 1986) mais pas au nord de 40°.

Water from the Atlantic that flows into the Mediterranean and follows the Algerian coasts occasionally drifts northwards, forming the "Algero-Provençal branch", represented here as a dotted line. This has been contested (WMCE 1986) for the southern part (south of the Balearic Islands and Sardinia), but not for the part north of the 40th parallel, where the whale track is contained.

se situent dans le courant catalan, de jour ou très tôt avant le lever du soleil, par exemple :

- le 19.10 de 5 à 6h à la vitesse de 3,5 km/h (lever du soleil à 6h) ;
- le 20.10 de 13 à 14h45 à la vitesse de 4,1 km/h (coucher du soleil 16h44) ;
- le 21.10 de 3 à 5h à la vitesse de 4,2 km/h (lever du soleil à 6h01).

Ces fortes valeurs de la vitesse du Bp sont à relier à son comportement pour se procurer du krill ; en effet, il plonge sur des essaims concentrés d'Euphausiacés, petites crevettes qui migrent chaque jour vers 600 m de fond (en Méditerranée NW) pour se protéger des prédateurs (dont les thons) et remontent vers la couche de surface qu'elles atteignent au coucher du soleil ; mais 1,5 h à 2 h avant le coucher, elles sont encore groupées en essaim qu'on détecte bien par échosondeur entre 75 m et 100 m (VIALE & FRONTIER, 1994) ; ensuite, elles se dispersent dans la couche euphotique, où elles consomment le plancton qui a été produit dans la journée.

Une à deux heures avant le lever du soleil, elles amorcent leur descente et se regroupent en dessous de 50 m. Quand un baleinoptère détecte un essaim concentré dans son entourage immédiat, il doit aller très vite au-dessus pour plonger et s'éviter d'avoir à plonger plus profond. Pour valider ce raisonnement il faut montrer la présence de ressources en krill. Or, la production de krill ne se fait pas dans le courant, mais éventuellement sur ses bords au contact de masses d'eaux calmes, riches en espèces, dans ce qu'on nomme des zones frontales ou des méandres. Nous l'avons démontré pour le courant liguro-provençal (VIALE, 1991, 1995) et dans le cadre du Programme National « Frontal CNRS », sur le front interne du courant ligure Tomofront 1988 ; d'autre part, sur le front « Alméria-Oran » dans le programme « Western Mediterranean Circulation Experiment » (VIALE & PISTECK, 1988 ; VIALE & FRONTIER, 1994). Dans notre expérience Argocet, notons que l'existence simultanée possible des 2 courants, l'un vers le Sud et l'autre vers le Nord, déterminerait une turbulence par friction des masses d'eau, apte à créer une production de biomasse entre le 7 et le 11 octobre, y justifiant certaines plongées de Bp.

### Démonstration chiffrée de l'inertie du Bp dans les courants

Le tableau 1 (colonne 4) montre les valeurs calculées de la vitesse du Bp de 20h30 à 1h50 pour chaque jour du circuit, dans les masses d'eau circulantes, en partant du 7 octobre (haut du tableau, ligne 3 et angle inférieur droit de la Figure 3) jusqu'au 22 oct. (bas du tableau) correspondant à la sortie du courant catalan représenté à l'angle inférieur gauche du tracé en ellipse (Figure 3).

Il apparaît nettement sur le tableau 1 que les chiffres de la colonne 4 pour la vitesse de Bp pendant le hiatus (20h30-1h50) sont bien :

- de l'ordre de grandeur des vitesses indiquées sur la carte nautique jointe, pour les courants permanents provençal et Catalan compte tenu de leur taux de variabilité ;
- compatibles avec les informations données pour la vitesse de courants temporaires ;

– mais très différents de ceux des colonnes 3 (vitesses de segments pré-hiatus) et 5 (vitesses de segments post hiatus) : le Bp a des vitesses différentes montrant qu'il est actif en dehors du hiatus, le reste de la nuit et le jour ; il ne flotte pas inerte dans le courant 24 heures sur 24.

**Dans le courant temporaire**, du 7 au 10 octobre, le Bp a une trajectoire en ligne brisée (Figure 3), de l'angle inférieur droit du tracé, en direction NW, jusqu'au niveau du courant provençal. Ce qui suggère qu'il est dans un courant vers le NW comme ce courant, dit « occasionnel », en automne et hiver, appartenant au Circuit Ibérique.

La Figure 3 montre des segments de nuit de longueur semblable et supérieure à celle de certains segments de jour ; la colonne 4 du Tableau 1 montre (lignes 3 à 6) que les vitesses de Bp dans le hiatus du 7 au 10 oct. – respectivement 0,72 ; 0,84 ; 1,2 ; 0,50 km/h – pourraient bien être des valeurs plausibles compatibles avec la vitesse du « courant Ibérique », SE-NW. En effet, le Bp se déplace le jour (Figure 3) en zig-zag, aidé par la force de Coriolis quand il se dirige vers l'Est ou au contraire contre la force de Coriolis vers l'Ouest. La vitesse du Bp sous l'effet seul de la force de Coriolis a été calculée dans les boucles de la phase d'inertie de 0,21 à 0,31 km/h (Tableau 1, lignes 1 et 2). Ajouter ou retrancher la vitesse de l'effet Coriolis justifie donc une partie de la variabilité de ces valeurs calculées et rend plausible une vitesse moyenne probable de ce courant qui portait le Bp en 1991, à 0,75 km/h (voir 0,8 à 0,9 km/h indiqué sur la carte, pour le courant ibérique).

La comparaison est alors possible avec les valeurs des vitesses du Bp indiquées dans les colonnes pré- et post-hiatus, supérieures à celles du hiatus ; elles montrent que le Bp est actif dès la fin de la nuit ou le jour avec des vitesses différentes de celles du hiatus ; le Bp montre donc bien une phase d'inertie, pendant le hiatus se laissant porter à la vitesse du courant de 20h30 à 01h50 au moins.

La longueur des segments parcourus par le Bp de jour varie aussi en fonction du nombre de ses plongées quand de la nourriture est disponible ; car ces courants du Sud et du Nord peuvent coexister parallèlement, créant une turbulence des masses d'eau et par suite donnent lieu à de possibles enrichissements en plancton.

**Dans le courant provençal**, l'entrée du Bp (Tableau 1) se fait du 10 oct. à 19h02 au 11 oct. à 01:43:49 h, à la vitesse de 1,6 km/h sur un parcours de 10 km. La colonne des vit/h hiatus fournit pour les 4 jours : 11, 12, 13, et 14 octobre, des valeurs de vitesse compatibles avec celles fournies par la carte nautique pour le courant liguro-provençal dont la vitesse augmente à proximité de la côte (MILLOT & TAUPIER-LETAGE, 2005) : par exemple de 1,6 km/h le 11 octobre à 2,0 km/h le 14 octobre, quand le Bp est alors au pied de l'escarpement des Maures (voir Figure 2).

La vitesse du Bp le 14 octobre entre 17h43 et 19h23 est encore de 1,3 km/h (celle du courant provençal), mais le Bp vire vers le sud et entre dans le canyon où sa vitesse à la fin du hiatus n'est plus que 0,635 km/h. La vitesse de Bp calculée pour le hiatus, avant le virage dans le canyon, est dans l'intervalle des valeurs admises pour le courant provençal ; alors que dans la journée, les vitesses calculées sont différentes, supérieures quand le Bp nage activement dans le sens du courant, ou inférieures s'il nage en sens

**Tableau I**

**Vitesses calculées sur les segments de 20h30-1h50 dits « Hiatus ».**

- Colonne 1 :** Date (d'octobre 1991) de première localisation du jour, qui marque la fin du Hiatus.  
**Colonne 2 :** Heure précise de la première localisation qui n'est pas toujours le premier passage du satellite.  
**Colonne 3 :** vitesse moyenne calculée dans un des segments pré Hiatus.  
**Colonne 4 :** vitesse moyenne calculée dans le segment dit Hiatus.  
**Colonne 5 :** vitesse moyenne calculée dans un des segments post Hiatus.  
**Colonne 6 :** durée du Hiatus ; si le Bp n'a pas été perçu au 1er passage du satellite, il l'est souvent au second, soit environ 1h20 après, (cf col. 2 car cela modifie la durée du hiatus).  
**Colonne 7 :** information sur la situation géographique du segment Hiatus d'après la Figure 3.

**Table I**

**Speeds on segments from 20h30 to 01h50, dubbed "Hiatus"**

- Column 1 :** Date (in October 1991) of first trackpoint in a day, marking an end of Hiatus.  
**Column 2 :** Time of first location (not always corresponding to the first satellite transit).  
**Column 3 :** average speed computed in one of the pre-Hiatus segments.  
**Column 4 :** average speed computed in the Hiatus segment.  
**Column 5 :** average speed computed in one of the post-Hiatus segments.  
**Column 6 :** Hiatus duration; if the Bp has not been detected at 1st satellite transit, it is detected at the second transit (1h20 later), (cf col. 2 as it changes the hiatus duration).  
**Column 7 :** information on the geographic localisation of the Hiatus, from Fig. 3.

	Vitesses pendant le hiatus						7
	1	2	3	4	5	6	
	Date de la 1 <sup>ère</sup> localisation et n° de passage	Heure fin hiatus	Vitesse pré-hiatus (km/h)	Vitesse hiatus (km/h)	Vitesse post-hiatus (km/h)	Durée hiatus (heures)	Commentaires
1	05 (1)	01:15:58		0,22		5:43:59	boucle
2	06 (1)	02:42:00		0,31		7:33:14	boucle
3	07 (1)	02:30:00	1,4	0,72	pas de données	5:58:37	in courant tempor.
4	08 (1)	02:19:47	2,6	0,84	pas de données	6:09:22	"
5	09 (1)	02:06:10	1,4	1,2	1,6	6:16:26	vers Est
6	10 (1)	01:55:00	3,2	0,50	1,2	6:30:36	vers W
7	11 (1)	01:43:49	1,5	1,6	3,0	6:34:08	entrée co Provençal
8	12 (1)	01:32:03	1,9	1,5	0,83	5:04:05	"
9	13 (1)	01:41:42	1,1	1,6	1,2	5:15:50	"
10	14 (1)	01:07:06	1,3	2,0	4,7	5:21:00	"
11	15 (1)	00:57:00	1,3	0,63	1,7	5:33:25	sortie co Provençal
12	16 (1)	02:24:29		0,22		5:42:07	boucle in canyon
13	17 (1)	02:14:18		0,18		5:52:55	"
14	18 (1)	02:03:10		0,13		6:01:12	fin de boucle canyon
15	18 (2)	03:43:12		1,7			entrée in co Catalan
16	19 (1)	01:52:14	0,9	1,7	3,5	6:11:20	"
17	20 (1)	01:40:19	2,2	2,0	2,6	6:56:10	"
18	21 (1)	03:09:00	1,3	1,3	4,2	6:30:04	"
19	22 (1)	04:36:00	2,0	1,1	0,93	8:16:19	sortie du co Catalan
20	23 (1)	02:45:00	0,87	0,16	0,81	6:47:10	boucle
21	24 (1)	02:34:00		0,23		6:57:36	boucle

La lecture du tableau se fait de haut en bas, dans le sens du circuit de Bp tracé en ellipse sur la Figure 3 depuis l'angle inférieur droit daté du 7 octobre jusqu'à l'angle inférieur gauche daté du 22 octobre ; l'absence de donnée = inexistante ou éliminée. Les lignes 1 ; 2 et 21 ; 22 du tableau concernent des eaux non circulantes dans lesquelles le Bp a eu des phases d'inertie en boucles caractérisées par une vitesse très faible de 0,16 à 0,23 km/h ; en continuité, les lignes 3 à 20, colonne 4 montrent des vitesses très supérieures car le Bp est dans des eaux circulantes.

contraire. Ce qui revient à dire que le Bp cesse toute activité dans le créneau horaire de 19h à 1h30 le lendemain : il se laisse porter par le courant, en inertie, pendant 5 à 6 heures ; la baleine dort donc dans le même créneau horaire que celui démontré dans les masses d'eau non circulantes (VIALE *et al.*, 2019).

**Dans le courant catalan**, le Bp entre le 18 octobre dès 03:43 h du matin après l'intermède du Canyon (Tableau I, ligne 16) : sa neuvième et dernière localisation est à 19h40 ; il est localisé le 19(1) à 1:52:14 au premier passage du satellite : la distance parcourue pendant le hiatus, est un segment de 10,15 km à la vitesse de 1,7 km/h (colonne 4 du Tableau I : Vit/h hiatus). Dans cette même colonne 4 du tableau, on lit que Bp a eu pendant les nuits du 19 au 22 une vitesse de :

- le 19(1) : 1,7 km/h ;
- le 20(1) : 2,0 km/h ;
- le 21(1) : 1,3 km/h ;
- le 22(1) : 1,2 km/h.

Ces valeurs de la vitesse de Bp sont toutes de l'ordre de celles admises pour le courant Catalan, compte tenu de sa variabilité en fonction de la forme et de la proximité du talus continental : le Bp est donc bien en inertie dans le courant, de 20h30 à 1h50 ; il y dort (cqfd).

La durée du dernier hiatus dans le courant catalan le 22 (1) est 8,272 h indiquée (colonne 6) parce que le Bp n'a pas été détecté (probablement déjà en plongée) le 22 au matin lors des deux premiers passages des satellites, mais seulement à 04:36:00 h (colonne 2) ; il faut donc retrancher 2,5 h, intervalle de temps entre le premier et le troisième passage du satellite ; ce qui ramène la durée probable du hiatus à 5,872 h. sur un parcours de 9,7 km.

**Le Bp est sorti du courant Catalan** ; il ralentit sa vitesse à 0,9 km/h au quatrième passage du satellite et 0,25 km/h au cinquième, à 8h35 sur 0,4 km de parcours : ceci montre qu'il fait une pause comme une sieste de récupération d'énergie après de gros efforts de jour dans le courant Catalan. Le Bp est alors rendu dans des eaux non circulantes, comme le prouvent les deux nuits suivantes, les 23 et 24 (voir les deux dernières lignes du Tableau I) par des boucles d'oscillation d'inertie, avec une vitesse du hiatus de 0,16 et 0,23 km/h qui traduit la force de Coriolis seule, montrant que la baleine est en inertie totale : elle « dort » (VIALE *et al.*, 2019). Si les vitesses de la baleine dans le hiatus vécu en courant catalan de 20h30 à 1h50 sont cohérentes avec les valeurs de la vitesse admise pour ce courant (indiquée sur la carte nautique), elles sont en revanche très différentes de celles calculées dans les créneaux horaires pré et post/h hiatus : inférieures si le Bp nage à contre-courant ou supérieures, telles que 4,2 ; 4,4 ; 3,5 km/h, quand le Bp nage activement dans le sens du courant (colonnes pré et post/h hiatus du Tableau I).

L'analyse des données recueillies pendant le trajet dans le courant catalan montre que la baleine se laisse porter en phase d'inertie, donc elle dort de 20h30 à 1h50 : mais elle ne dort que dans ce créneau, elle est active le reste du temps.

Dans l'intermède des 3 jours passés dans le canyon. En effet, du 15 octobre dans la journée au 18 octobre au matin, la Baleine est dans le Canyon profond du Golfe du Lion,

dont MILLOT & TAUPIER-LETAGE (2006) écrivent qu'il « coupe le courant » (« cut ») ; ce qui est vérifié ici : pour les trois nuits passées dans le canyon, les vitesses de Bp, calculées pour le segment « hiatus » présentées au Tableau I (lignes 12, 13, 14), sont très faibles. Ce sont les valeurs des vitesses des boucles caractéristiques des phases d'inertie dans les eaux non circulantes comme celles citées dans les deux premières et deux dernières lignes du tableau.

## Conclusion

La trajectoire du Bp marqué, suivi pendant 41 jours, montre une partie en ellipse suivant pro-parte la circulation générale du courant marin permanent « nord-méditerranéen » et une partie interne à l'ellipse représentant 26 jours de suivi, dans des masses d'eau calmes, agitées d'un mouvement de rotation liée à la rotation de la terre et nommée « oscillation d'inertie » ; celle-ci, communiquée à tout objet inerte-flottant, n'est visible que par un observateur extérieur à la Terre (Télé-détection) sous la forme d'une boucle en alpha tracée dans le sens des aiguilles d'une montre. Donc si le Bp marqué trace des boucles en alpha, c'est qu'il flotte en inertie totale. Il dort. Cette boucle, en effet, définit les deux conditions nécessaires au sommeil pour un cétacé : inertie totale et flottaison. Dans les paragraphes précédents, nous avons expliqué comment on calcule la somme des angles de rotation de Bp. Nous avons dénombré 26 boucles pour 26 jours consécutifs du suivi : un sommeil quotidien (VIALE *et al.*, 2019).

On démontre ici que le Bp marqué dort également dans le même créneau horaire pour les quinze jours restants de son suivi, vécus dans le courant permanent Nord-Méditerranéen, pour lesquels les boucles ne se manifestent pas, comme le démontrent les bouées dérivantes-Argos utilisées pour cartographier les courants, parce qu'elles cessent de faire des boucles quand elles dérivent sur des courants (VIALE *et al.*, 2018).

Nous démontrons également que la vitesse du Bp marqué, calculée à partir de ses localisations par télé-détection Argos en 1991, entre 20h30 et 1h50 du matin, pendant les jours où nous l'avons supposé comme étant dans le courant Nord-méditerranéen géographiquement, est bien égale à la vitesse de ce courant telle que fournie sur la carte nautique ancienne du Service hydrographique de la marine 1956 contrôlée en 1994. Donc la baleine est bien inerte dans le courant entre 20h30 et 2h : elle dort dans les courants Provençal, Catalan et Ibérique dans le même créneau horaire qu'en eau non circulante.

Au total, la baleine dort partout en mer, pendant 6 à 7 heures au moins de 20h30 à 1h50 ; dans le segment de son parcours qui précède juste 20h30, sa vitesse est souvent déjà celle calculée pour le hiatus ; ce qui suggère qu'elle est peut-être déjà endormie ; elle se réveille très tôt, souvent dès 3h du matin. Ce rythme de vie est commandé par le rythme de migration nyctémérale des euphausiacés totalement inféodés au rythme solaire. En revanche, l'absence de succès dans la quête de nourriture ne semble pas altérer le cycle du sommeil : ni la faim, ni la soif n'altèrent la phase de sommeil quotidien ; nous avons montré par ailleurs que la baleine et d'autres espèces de cétacés se procurent de l'eau en désalinisant l'eau ingur-

gitée dans leur bol alimentaire grâce à une hypertrophie de la fonction sudoripare (VIALE 1979 ;VIALE & MASSON-VIALE, 2009).

La covariance convenable des rythmes des divers éléments d'un écosystème est une nécessité, mais une des difficultés de son bon fonctionnement ; ce qui a inspiré de nombreuses recherches (TERRIS *et al.*, 1999 ;VIALE, 1991, 1995 ;VIALE & FRONTIER, 1987 ;VIALE *et al.*, 1989, etc).

Il semble que ce problème transperce cette belle histoire d'une expérience de suivi d'une baleine. La nécessité pour le Bp de se nourrir de biomasses concentrées en essaims, et si possible, pas trop profonds, lui impose un intervalle étroit d'intervention de 2 heures avant le lever de soleil (après, les essaims sont trop profonds) à 2 heures avant le coucher du soleil (après, l'essaim est dispersé dans la couche d'eau superficielle et n'a plus d'intérêt pour Bp). Le tableau de nos données calculées montre qu'au deuxième passage du satellite, c'est-à-dire vers 3h20, le Bp est souvent déjà en action pour guetter la formation de l'essaim au cours de la descente du krill dès 3-4 h du matin.

La trajectoire de la baleine marquée manifeste donc un emploi du temps laborieux, à un rythme « soutenu » démontré par la nécessité pour elle de « courts repos-siestes » soit après un effort de nage rapide, soit de nage à contre-courant, soit après une série de plongées trop longues ou trop profondes ; toutes nos informations sont déduites de la comparaison des vitesses des segments consécutifs, leur longueur, leur durée et le nombre et/ou la forme des messages émis : isolés ou en salve.

Sur un parcours total calculé de 1 178 km, sans s'occuper de l'aspect fractal (MOUILLOT & VIALE 2001), le Bp a eu une vitesse moyenne de 1,3 km/h sur un espace long de 200 km et large d'un peu plus de 130 km (41°45' à 43°00' en latitude). L'intérêt d'avoir inscrit avec précision la trajectoire de Bp sur la surface de la terre, comme le montre la Figure 2 sur la Carte extraite de Google Earth, est de montrer avec quel soin méticuleux il inspecte les anfractuosités (canyons) du talus continental du Golfe du Lion : cette zone est bien connue comme étant enrichie en nutriments par l'effet d'upwelling déclenché par le virage brutal du courant provençal côtier vers le large au sud, devenant le courant catalan ; le Bp inspecte tous les petits canyons, trouve des biomasses concentrées (petits poissons de fourrage ou euphausiacés ?) dans le grand canyon profond de Bourcart ; on déduit là en effet qu'elle doit plonger beaucoup et profond, de deux informations tirées des localisations fournies : i) les vitesses des parcours étroits et ii) les temps d'émergence prolongés qui se traduisent par de longues salves de messages émis, la balise étant alors en surface.

Mais l'intérêt de Bp n'est peut-être pas seulement nutritionnel car nous avons appris antérieurement, au cours de nos campagnes en mer combien le Baleinoptère est curieux et avide de divertissements, mais uniquement pendant ses phases d'inactivité soit crépusculaire, quand le krill n'est plus disponible soit en milieu de journée quand le krill est trop profond pour entreprendre une plongée coûteuse en énergie, et s'il n'a pas trop faim (VIALE & PISTEK, 1988 ; VIALE & FRONTIER, 1994).

Comme les mammifères herbivores terrestres qui parcourent tout un circuit pour obtenir un apport substantiel

de nourriture, le Bp marqué suit un parcours qui semble bien rodé (VIALE *et al.*, 1996) vus les changements d'orientation brutaux, sans hésitation, utilisant les courants pour se déplacer en économisant de l'énergie musculaire ; mais à ce rythme, le Bp dévoile de l'impatience et accélère en doublant par sa nage la vitesse du courant catalan ; la faim le pousse-t-elle à dépenser de l'énergie pour parvenir plus rapidement à l'aire de pâturage riche du Front Baléarique ? Alors une question se pose : le rythme de production des écosystèmes visités est-il suffisant pour couvrir le taux de prédation du Bp, du 6 octobre où il quitte la zone riche, au 22 octobre où il atteint à nouveau la zone riche du Front baléarique. Seize jours, c'est probablement insuffisant pour régénérer les biomasses concentrées qui lui sont nécessaires. Et ce problème se posait dès 1991 !

Au total, le Bp marqué d'une balise Argos, a montré une phase de sommeil chaque nuit en flottaison en surface et en inertie totale. Cette phase débute environ deux heures après le coucher du soleil et dure 6 à 7 heures. L'activité de plongée de la baleine peut reprendre dès 3 heures du matin, mais elle cesse à 15h30 à la fin septembre et à 14h30 fin octobre (parce que le coucher de soleil se décale d'une heure).

La phase d'inertie nocturne de la baleine est une mise en repos de la commande motrice cérébrale : elle assure donc une partie fondamentale des fonctions du sommeil, un sommeil quotidien.

## Remerciements

Financements : CNRS Aide n° 34915 AD12, Laboratoire d'écologie des cétacés ; Université Paris VI (ERA 715 Pr. Paul Nival, Villefranche-sur-mer) ; Université de Corse (Faculté des sciences, CEVAREN) ; Région Corse ; Armée de Terre (2<sup>ème</sup> REP de Corte) ; fonds privés.

Nous tenons à rendre hommage à Roger Chesselet, fondateur et responsable de l'INSU au CNRS au moment de notre projet du Suivi "Argocet" qu'il a accepté d'emblée. Mais conscient de sa difficulté, il a caché ses doutes avec humour : « Si vous réussissez, c'est la gloire ! » (com. pers. Cannes CIESM, 1982).

Nous souhaitons remercier :

- le Comité Inter Régional Méditerranéen pour l'attribution des navires et moyens à la mer du CNRS, la Commission Nationale CNRS-IFREMER pour l'attribution des navires de l'IFREMER en valorisation de transit pour des missions lointaines (Noroit, Suroit, dernier voyage du Charcot !)
- l'ingénieur Jean Jacques Pesando de Nice, concepteur de nos balises Argos ;
- les officiers-tireurs d'élite Patrick Braconnier et Maurice Fenouillère (2<sup>ème</sup> REP, Corte) ;
- le technicien-guetteur Jacques Roquefère pour son aide courageuse à Carli Viale dans le canot d'approche de la Baleine ;
- Nelly Terris, Isabelle Palazzoli, Anne Marie Isetti, Jean-Pierre Frodello, P. Deleplanque ; A. Giordano ; J.M. Legall ; D. Cousin ; V. Fallet ; J.-P. Frodello ; D. Mouillot, qui ont porté le projet ;

- les équipages du N/O Korotnef ou Antedon et plus particulièrement les marins du N/O Catherine Laurence qui ont proposé de rester en mer, au soir du 21 septembre 1991 : ils nous ont permis ainsi de réussir à marquer la baleine tôt le lendemain ;
- le Centre de météorologie spatiale de Lannion nous fournissant les cartes de fronts thermiques ;
- M.M. et Mmes Taillade, Gros, Ortega et collègues suivants, du service CLSARGOS (Centre de localisation par satellite Argos) de Toulouse ;
- Laurent Masson et Jean-Noël Sallembien, Société INTECUM Bastia (Corse), qui ont fourni le scan des listages ARGOS ;
- Dominique Weyth et tous ceux, marins, techniciens du CNRS ou bénévoles qui ont participé ou aidé à réaliser cette mission Argocet.

## Références

- Campagne Océanographique Internationale pour l'étude des courants en Méditerranée Occidentale organisée par la NORDA, USA en juin 1986. Voir WMCE.
- Carte Nautique : « Courants de surface en Méditerranée dans leur relation avec la Météorologie » ; Service Hydrographique de la Marine, Paris 1956, d'après la Carte d'opérations de secours aéro-maritime, éditée en 1955 par l'Aéronautique Militaire Italienne (« CARTA di NAUFRAGIO », échelle 1 : 5 000 000).
- JONSGARD, A. (1966).- Biology of the North Atlantic Fin whale *Balaenoptera physalus*, distribution, migration and food. *Hvalradets Skrifter*, **40**, 1-62.
- MILLOT, C. (1987).- Circulation in the West Mediterranean Sea. *Oceanol. Acta*, **10**, 143-149.
- MILLOT, C. (1991).- Mesoscale and seasonal variabilities of the circulation in the Western Mediterranean. *Dyn. Atm. Oceans*, **15**, 179-214.
- MILLOT, C. & CRÉPON, M. (1981).- Inertial oscillations on the continental shelf of the Gulf of Lions. Observation and Theory. *J. Phys. Oceanogr.*, **11** (5), 639-657.
- MILLOT, C. & TAUPIER-LETAGE, I. (2005).- Circulation in the Mediterranean Sea. *Hdb. Env. Chem.*, **5** Part K, 29-66.
- Mission Océanographique Internationale pour l'étude de la circulation en Méditerranée Occidentale en 1986 : voir WMCE.
- MOUILLOT, D. & VIALE, D. (2001).- Satellite tracking of a fin Whale tagged with an Argos PTT buoy and Fractal analysis of its trajectory. *Hydrobiologia*, **452**, 163-171.
- PICHOD-VIALE, D., DELEPLANCQUE, P. & MILLOT, C. (1993).- *Changement d'échelle et suivi d'une baleine par satellite*. Communication aux Rencontres du CNRS et du Programme National de Télédétection Spatiale : Changement d'échelles dans l'étude des milieux naturels par télédétection. Strasbourg, 17-19 May 1993.
- TERRIS, N., FRODELLO, J.P. & VIALE, D. (1999). Les cétacés dans l'ouest du Bassin Méditerranéen. Poids respectif des petites et grosses espèces dans la communauté. *Mer et Sciences*, **1** (2), 14-19.
- VIALE, D. (1979).- Mise en évidence d'une fonction excrétrice de la peau de certains Cétacés Odontocètes et Mysticètes. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **40**, 201-221.
- VIALE, D. (1985).- Cetaceans in the Northwestern Mediterranean: their place in the ecosystem. *Oceanogr. mar. Biol. Ann. Rev.*, **23**, 491-571.
- VIALE, D. (1991).- Une méthode synoptique de recherche des zones productives en mer : détection simultanée des cétacés, des fronts thermiques et des biomasses sous-jacentes. *Ann. Institut. Oceanogr., Paris*, **67** (1), 49-62.
- VIALE, D. (1995).- Courbes du courant liguro-provençal marquées par les grands cétacés. *Comité d'Océanographie Physique, Comm. Intern Expl. Mer Méditerranée*, **34**, 198.
- VIALE, D. & FRONTIER, S. (1987).- Échelles de temps et d'espace pour la prédation des cétacés dans un écosystème frontal. Colloque Programme National FRONTAL, Paris, mars 1987. Abstract in *Échelles spatio-temporelles pour l'étude des fronts*. Éd. CNRS-INSU, 22 p.
- VIALE, D. & FRONTIER, S. (1994).- Surface Megafauna related to western mediterranean circulation. *Aquat. Living Resources*, **7** (2), 105-126.
- VIALE, D. & MASSON-VIALE, A.C. (2009).- Évolution de la fonction sudoripare des Cétacés : de la disparition supposée à l'hypertrophie démontrée. Congrès de la Soc. Zool. de France sur L'évolution épigénétique héritable (Centenaire de Darwin). *Bull. Soc. Zool. Fr.*, **136** (1-4), 159-174.
- VIALE, D. & PISTEK, P. (1988).- Correspondence between surface megafauna and deep scattering layers related to the Western Mediterranean Sea circulation. In WMCE Newsletter, "Western Mediterranean Circulation Experiment", Symposium, Bay St. Louis, U.S.A. 11 : 69.
- VIALE, D. en collab. équipe Médicet. (1989).- Consommation dans le front liguro-provençal par la mégafaune de surface : conséquence pour les estimations de production du front en avril 1988. In "Devenir de la matière organique produite dans les zones frontales ; consommation, minéralisation, exportation, importance des phénomènes physiques". Table ronde "FRONTAL", 13-16 juin 1989. Abstracts Éd. INSU-CNRS, 23 p.
- VIALE, D., FRONTIER, S., PESANDO, J.J., VIALE, C., BRACONNIER, P., ROQUEFERE, J. & TERRIS, N. (1992).- Marquage réussi par balise Argos d'un baleinoptère en pleine mer sans capture. *Comm. Intern. Expl. Sc. Mer Méditerranée*, **33**, 315.
- VIALE D., KOECHLIN, L. & VIALE, C. (2019).- Sleep cycle of a Fin Whale tagged with Argos PTT, in North Western Mediterranean Sea. (doi : arXiv:1908.01101v1 [q-bio])
- VIALE, D., KOECHLIN, L., VIALE, C. & MILLOT, C. (2018).- Le sommeil d'une Baleine dans les courants marins de Méditerranée Nord-Occidentale ; 119<sup>e</sup> Journées annuelles de la Société Zoologique de France, Sixième Congrès Franco-Maghrébin de Zoologie. Paris, Abst., 31-32.
- VIALE, D., TERRIS, N., FRODELLO, J.P. & MOUILLOT, D. (1996).- A fin whale tracked by Argos PTT: use of space and feeding ground search behavior. Comm. at the 5<sup>th</sup> European conference on Wildlife Telemetry, Strasbourg, France, 25-29/08/1996. Actes (1996) PX-1.
- WMCE "Western Mediterranean Circulation Experiment", (1986). Organisée par la NORDA (NOAA) sous la direction du Pr. La Violette, Bay St. Louis, USA.
- WMCE "Western Mediterranean Circulation Experiment", (1988).- Newsletter 11, Symposium, Bay St. Louis, U.S.A. (1988).