

ATTIVITÀ T1.2

Prevenzione del rischio collisione con i cetacei marini

Prodotto T1.2.3

Cartografia dinamica del rischio di collisione

Partner responsabile: UTLN

data di inizio e di fine: 01.04.2019 – 31.03.2022

Versione finale, 31.10.2022

Riepilogo

Introduzione	3
Qualità dell'orientamento di BOMBYX2 e dato il suo angolo di osservazione	3
Rilevamento automatico da parte di Bombyx2 dei clic del capodoglio	4
Collegamenti URL di rilevamento del capodoglio	4
Stima degli angoli di arrivo di azimut ed elevazione	7
Raggio di rilevamento stimato del capodoglio	10
Qualità dei rilevamenti di balene	16
URL ai suoni dei rilevamenti di balene	17
Stima della posizione e del raggio di rilevamento della balena	19
Stima della distanza di Roqual	22
Valutazione, rapporto e decisione dell'avviso di collisione	24
Mappatura dinamica, prototipo	24
Apprendimento continuo della funzione AI di avviso anticollisione	26
Discussione e conclusione	27
Prospettive	30
Possibile Distribuzioni di rete BOMBYX	32
Bibliografia	35
Glossario	37

Gli Autori di questo prodotto sono: Herve Glotin, Paul Best, Maxence Ferrari, Sebastien Paris, Pascale Giraudet

Introduzione

Questo prodotto descrive le strategie di rilevamento e apprendimento online dei modelli di IA di bordo per stimare le posizioni di balenottere o capodogli e la conseguente allarme anti-collisione da parte delle boe Bombyx2. In particolare all'interno del progetto GIAS sono state effettuate delle misurazioni congiunte con le due boe per apprendere modelli a boa singola.

Il rapporto è così strutturato:

- innanzitutto presenta la qualità della stabilità dell'antenna BOMBYX2, garantendo una buona misurazione silenziosa dei cetacei e una capacità di stimare l'orientamento di BOMBYX2,
- poi viene mostrata la qualità dei rilevamenti di capodogli nella misurazione a bordo,
- vengono poi fornite le misure rilevate e mostrato come si è stimata la posizione del capodoglio,
- si conclude con le evoluzioni necessarie per perfezionare i rilevamenti e viene presentata **la mappa di monitoraggio del rischio di collisione che include lo stato del mare e l'AIS per una decisione di allerta ottimale.**

Qualità dell'orientamento di BOMBYX2 e dato il suo angolo di osservazione

Mostriamo di seguito le qualità del comportamento 3D della boa in corrente.

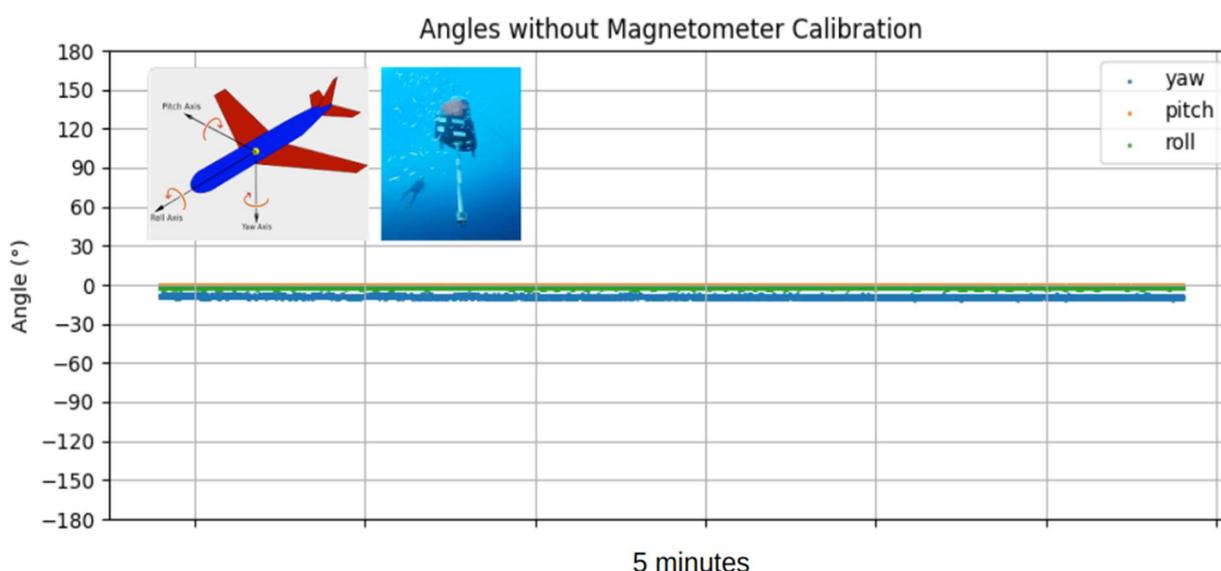


Figura: Misurazioni da parte della Motion Process Unit dei tre angoli di posizione della boa Bombyx2, che ne definiscono l'orientamento nello spazio (vedi nota con la rappresentazione del piano in alto a sinistra).

Le statistiche delle misurazioni dell'angolo da parte della MPU della boa Bombyx 2 mostrano un'ottima stabilità della boa nella corrente grazie al suo profilo naca. Ciò gli conferisce la capacità di misurazioni e rilevamenti molto affidabili di impulsi di balenottera comune e capodogli a bassa frequenza, come mostrato nelle sezioni seguenti.

Rilevamento automatico da parte di Bombyx2 dei clic del capodoglio

Di seguito riportiamo le rilevazioni generate dalle pose delle boe Bombyx2.

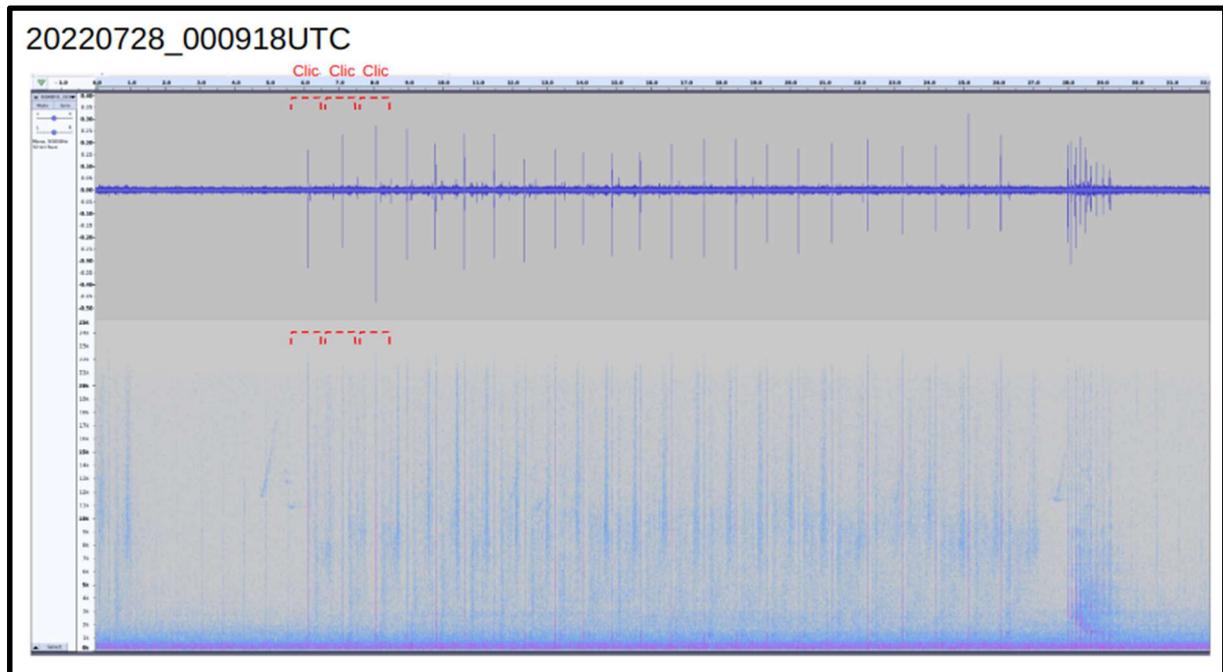


Figura: esempio di rilevamento di capodogli su Bombyx2 il 29 luglio 2022. È un treno di clic di spostamento, seguito da accelerazione. Si tratta di un singolo animale, la cui taglia viene calcolata automaticamente misurando gli intervalli tra gli impulsi (Giraudet et al 2023).

Forniamo qui collegamenti URL a questi rilevamenti

Collegamenti URL di rilevamento del capodoglio

🎵 [20220727_200918UTC_V12.wav](#)

🎵 [20220729_060919UTC_V12.wav](#)

🎵 [20220729_120919UTC_V12.wav](#)

🎵 [20220729_130919UTC_V12.wav](#)

🎵 [20220730_080920UTC_V12.wav](#)

🎵 [20220731_100923UTC_V12.wav](#)

♪ [20220801_140926UTC_V12.wav](#)

♪ [20220802_150926UTC_V12.wav](#)

♪ [20220803_120928UTC_V12.wav](#)

♪ [20220803_200929UTC_V12.wav](#)

♪ [20220804_070930UTC_V12.wav](#)

♪ [20220804_100930UTC_V12.wav](#)

♪ [20220804_190931UTC_V12.wav](#)

♪ [20220805_060932UTC_V12.wav](#)

♪ [20220805_080933UTC_V12.wav](#)

♪ [20220805_100933UTC_V12.wav](#)

♪ [20220808_130941UTC_V12.wav](#)

♪ [20220811_170943UTC_V12.wav](#)

♪ [20220812_110944UTC_V12.wav](#)

♪ [20220814_190948UTC_V12.wav](#)

♪ [20220815_090949UTC_V12.wav](#)

♪ [20220815_140949UTC_V12.wav](#)

♪ [20220816_180946UTC_V12.wav](#)

♪ [20220819_220948UTC_V12.wav](#)

♪ [20220821_120949UTC_V12.wav](#)

📄 [20220822_080950UTC_V12.wav](#)

📄 [20220822_120950UTC_V12.wav](#)

📄 [20220823_090947UTC_V12.wav](#)

📄 [20220824_030948UTC_V12.wav](#)

📄 [20221120_100006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221122_130006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221122_140006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221129_090006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221130_090006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221130_110006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221130_130006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221201_070006UTC_V12.wav](#)

📄 [20221202_090006UTC_V12.wav](#)

Ecco il calendario dei rilevamenti nell'estate 2022:

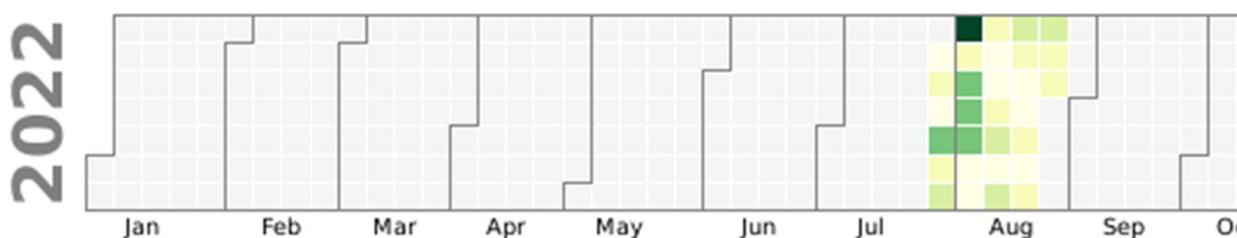


Figura: programma dei rilevamenti di capodogli BOMBYX2.1 e BOMBYX2.2 estate 2022

Stima degli angoli di arrivo di azimuth ed elevazione

Essendo Bombyx dotato di 5 idrofoni, misuriamo i tempi di arrivo dei click per coppia di idrofoni e risolviamo il calcolo del sistema degli angoli di Azimut ed Elevazione con un sistema lineare come nel metodo di calcolo della posizione dei capodogli con un'antenna dello stesso volume durante la missione Sphyrna Odyssey <http://sabiod.org/SO1.pdf>, Glotin et al 2021.

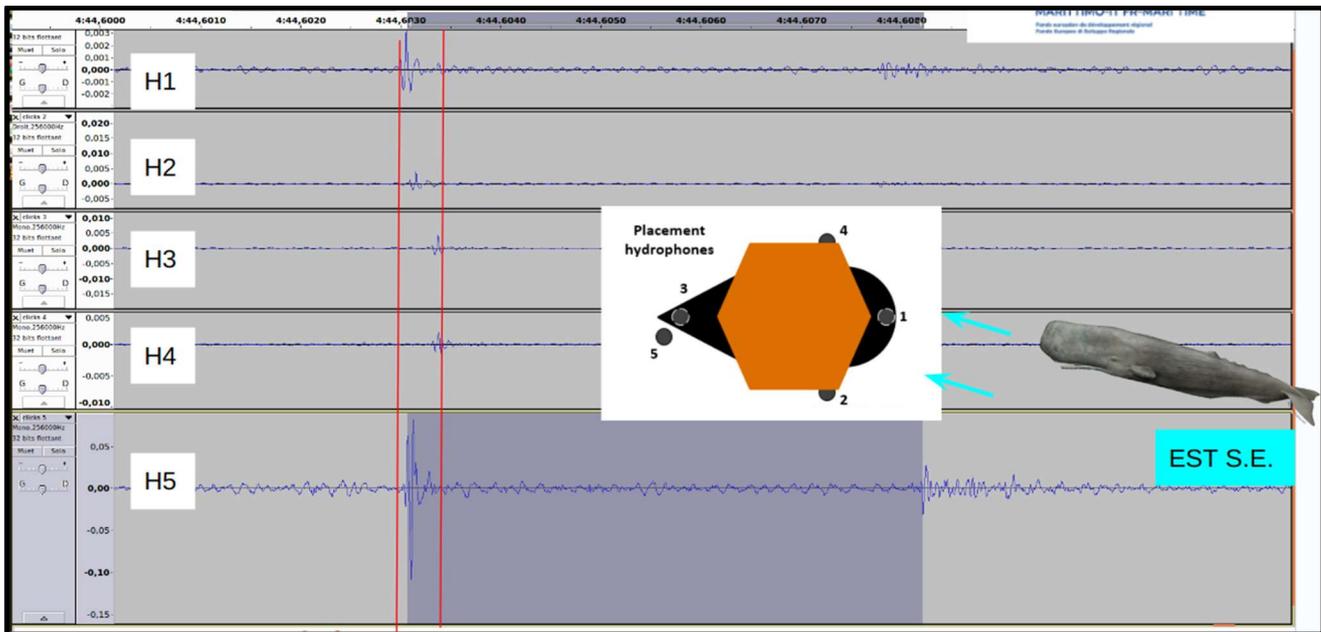


Figura: Illustrazione delle misure dei tempi di arrivo dei click di un capodoglio su Bombyx2, idrofoni da 1 a 5 richiamati nel diagramma al centro. Questo capodoglio è quindi posto a SE perché la boa è posta da Ovest a Est come figurato, incuneata nella corrente ligure, e come indicato dalle sue misure della sua Motion Process Unit.

Ciò si traduce nei seguenti angoli su due casi dell'estate del 2022 presi come esempio. Ci sono tracce del passaggio dei capodogli.

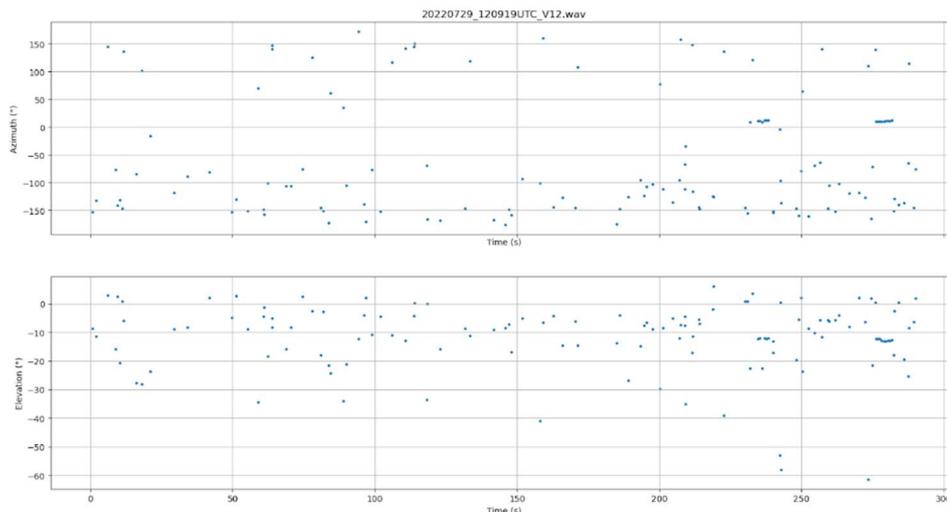


Figura: esempio di tracciamento in Azimut ed Elevazione dei click rilevati il 28 luglio con alla fine del tracciato circa 250 tracce continue in azimuth ed elevazione.

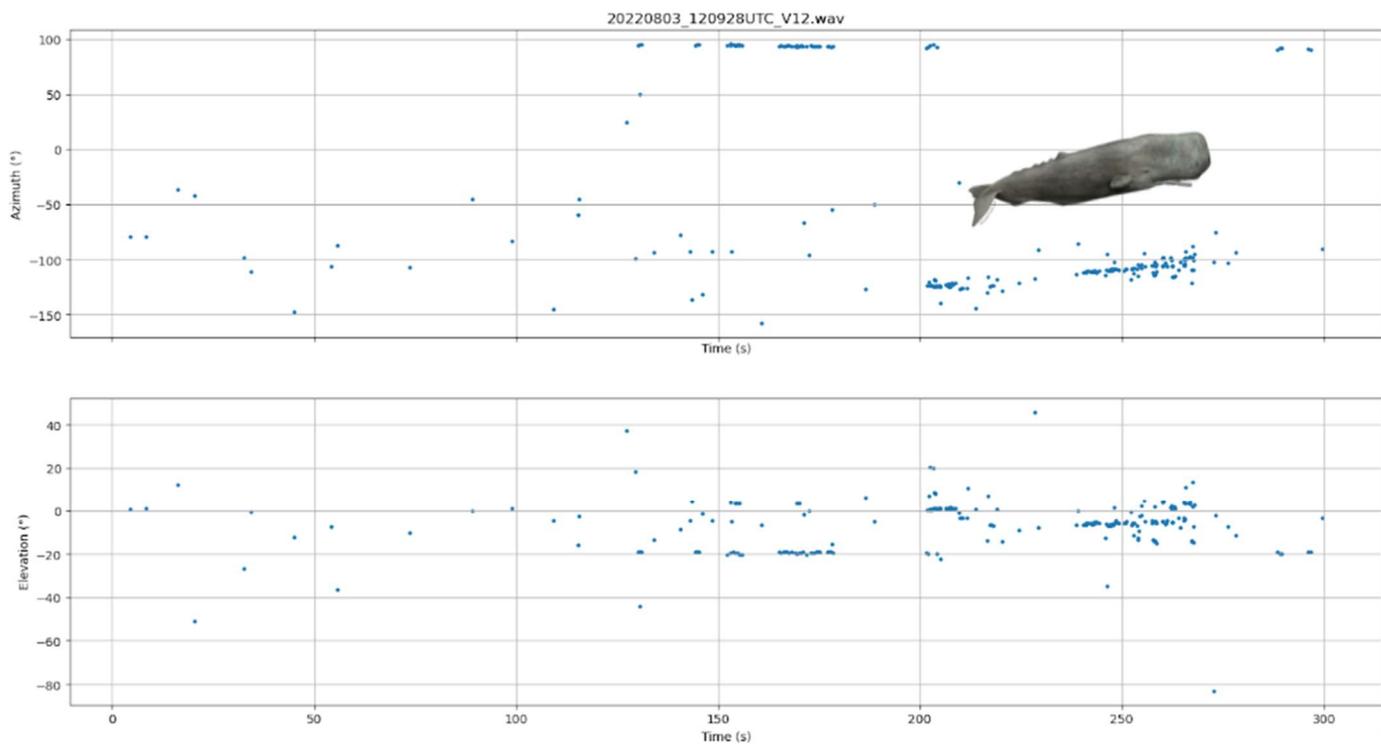
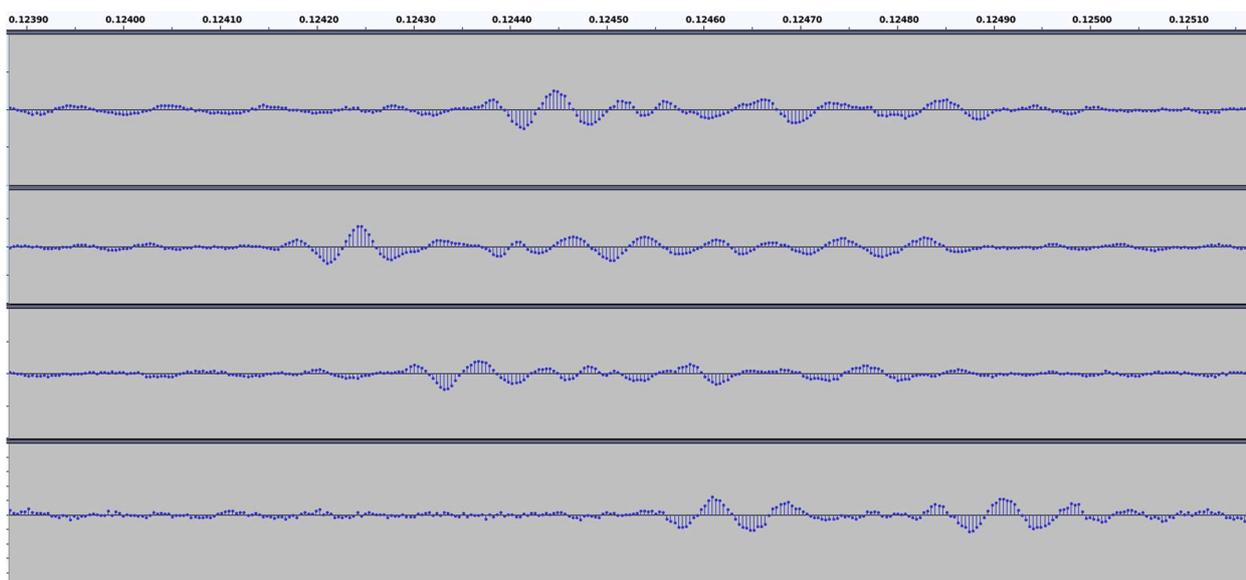


Figura: rilevamento e stima dell'azimut e dell'elevazione misurando i ritardi su ogni clic del capodoglio il 3 agosto 2022 (in alto). La traccia di elevazione da 150 a 250 secondi mostra l'animale che sale in superficie passando da -20° a -3° di elevazione dalla superficie e smette di fare clic.



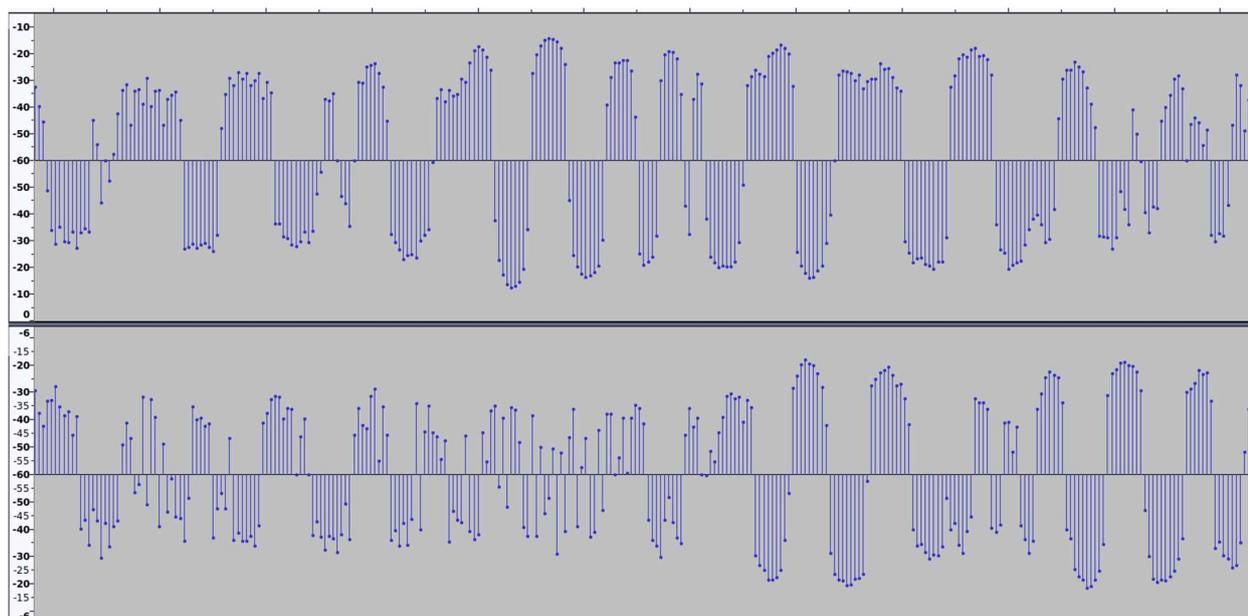


Figura: dettagli dei canali 1,2,3,4 (dall'alto verso il basso) al secondo 250 del 3 agosto 2022 alle 12:09, che mostra 53 punti dietro il canale 1 su 2 ($T_{21}=0.2031$ ms), $T_{23}= 0.1250$ ms e $T_{24} = 0,3711$ ms. Al di sotto dei dB picco-picco dei primi 2 canali, che mostra un picco del clic P1 del capodoglio a circa 10 dB sopra il rumore di fondo.

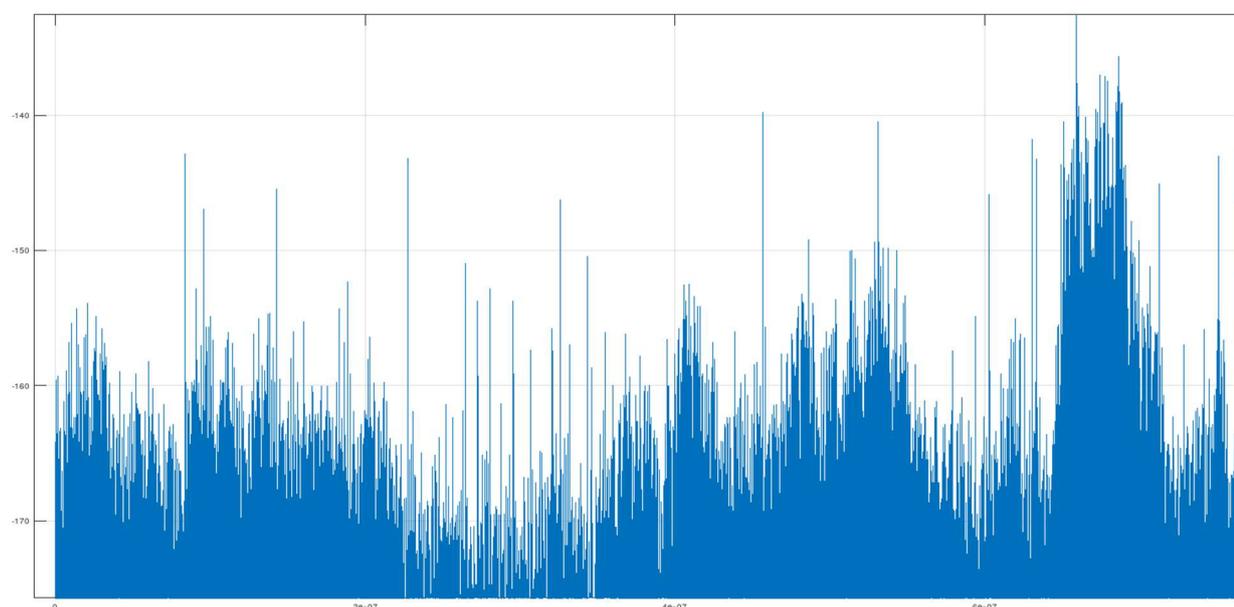


Figura: Misurazione dB picco-picco del segnale dello stesso giorno della figura precedente, alla stessa ora, che mostra il passaggio rilevato a -140 dB e il rumore di fondo picco-picco a -170 dB che mostra approssimativamente una sorgente apparente a + 25dB.

Raggio di rilevamento stimato del capodoglio

L'idrofono C57 ha una normale sensibilità indicata di seguito.

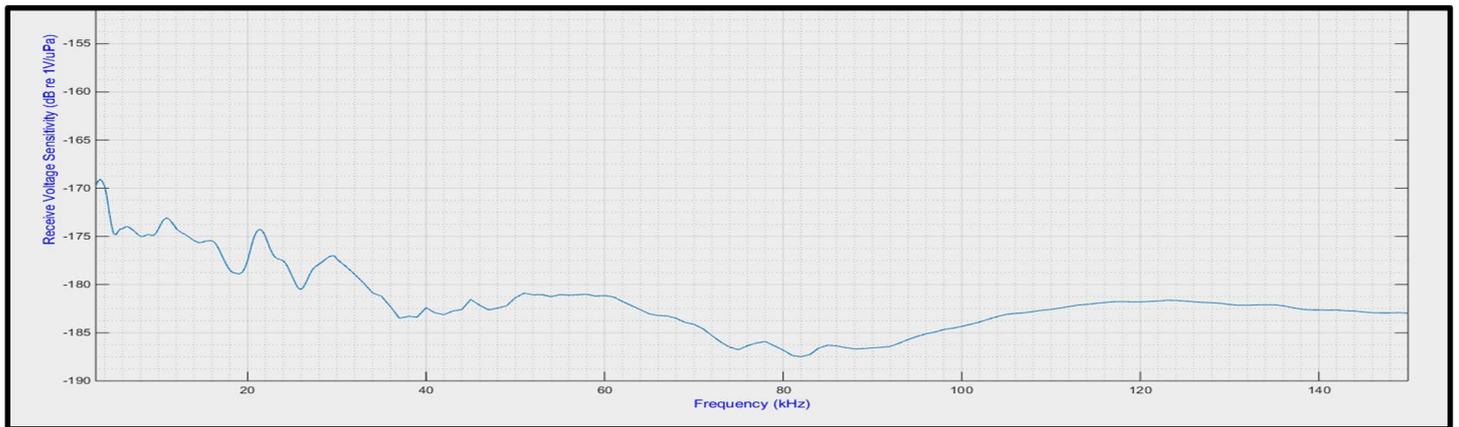
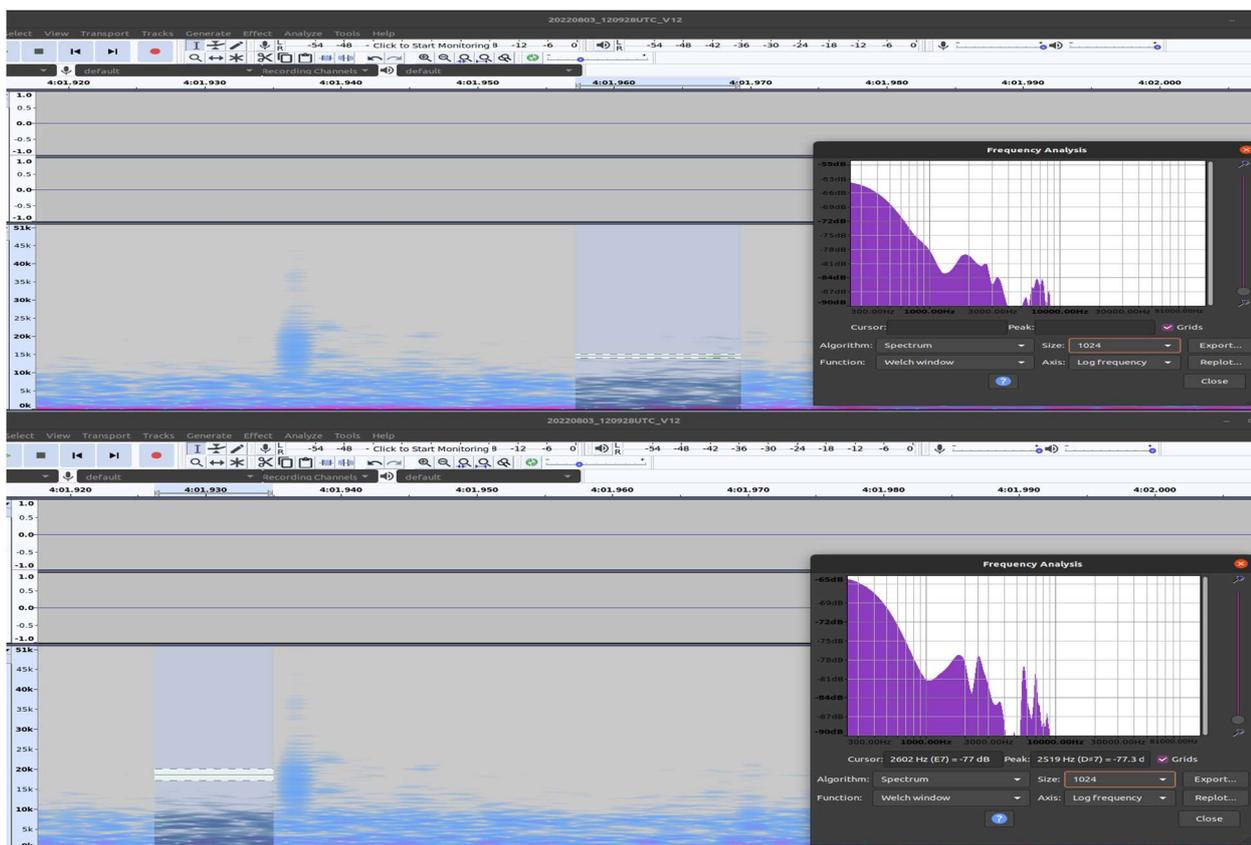


Figura: sensibilità dell'idrofono C57

Il guadagno della mappa è * 1. Ciò si traduce in una misurazione apparente del livello della sorgente nella registrazione (ASL) stimato dal picco (il picco sarà successivamente più accurato) del segnale registrato, meno la curva sopra.



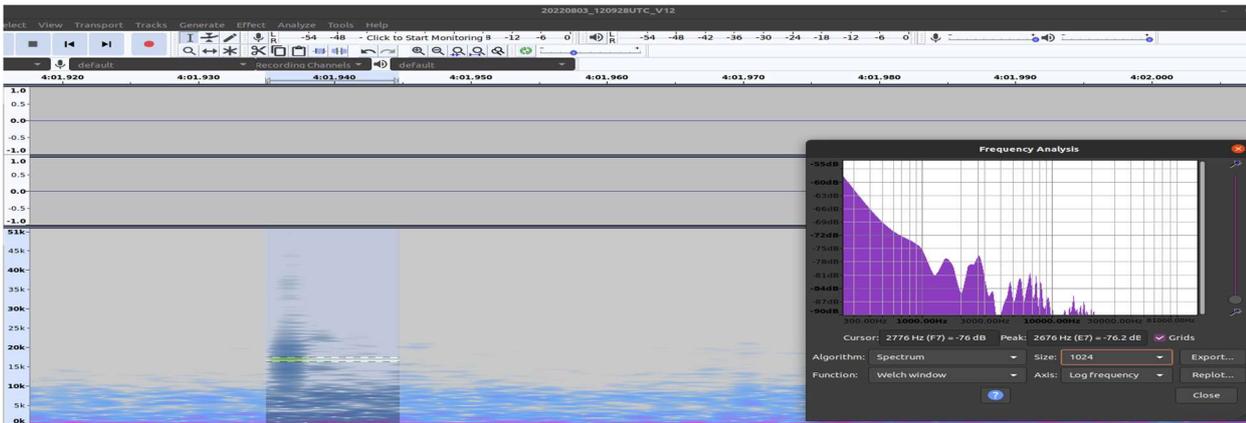


Figura: clic dei capodogli di Bombyx il 5 agosto 2022 (a sinistra) in tempo e frequenza, e Power Spectral Density (Welch) in dB nel rumore di fondo (in alto), nella componente P0 10 kHz) e in P1 (componente 20kHz)

Gli spettri di potenza misurati prima durante e dopo un clic il 3 agosto 2022 sopra mostrano livelli di 3 KHz e 10 kHz dB rispetto al rumore di fondo dell'ordine di 5 dB.

Inoltre Zimmer nel 2005 ha pubblicato i grafici dei livelli di dB a 1 m dal capodoglio per 3 tipi di emissione, una LF intorno ai 3 kHz e una P0 intorno ai 10 kHz, in media circa 188 dB rispettivamente 192 dB, come sotto:

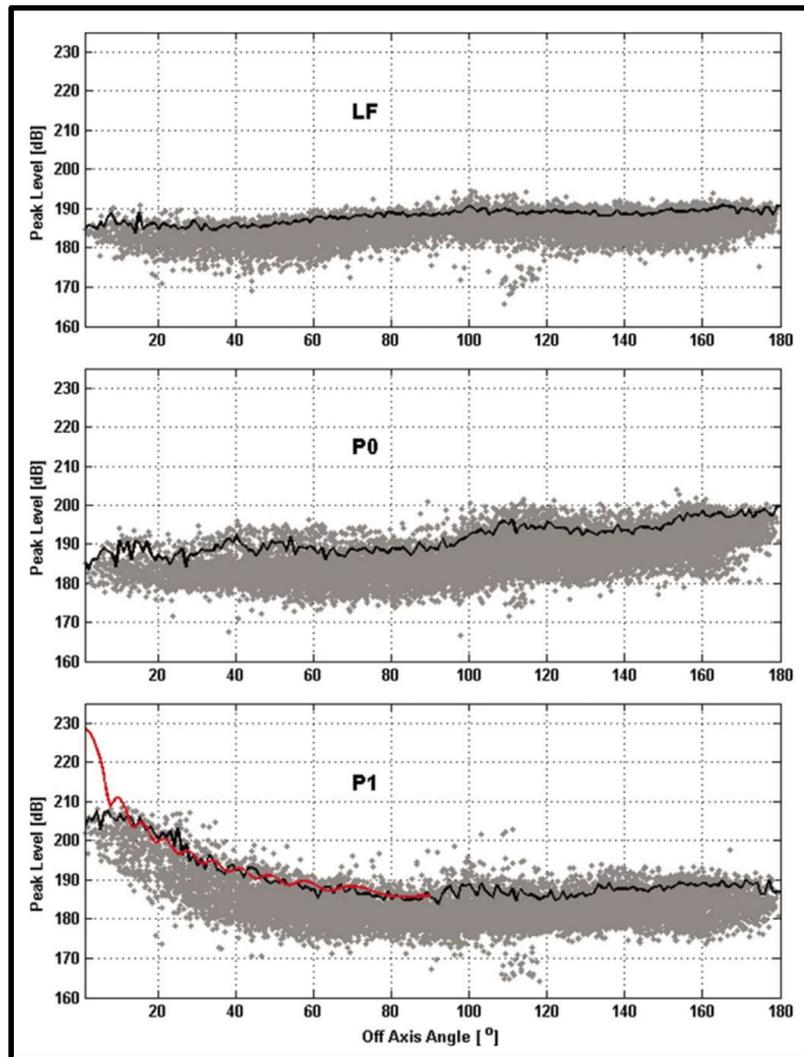


Figura: livello dB alla sorgente a 1 m di clic del capodoglio in funzione del loro orientamento (linea nera al 90° percentile), da Zimmer 2005. LF per 500 a 3kHz (media intorno a 188 dB), P0 per circa 10kHz (media intorno a 192 dB), P1 per circa 20 kHz.

Quindi il livello di perdita di propagazione di questo segnale di capodoglio è $TS(@10 \text{ kHz}) = 12 \text{ dB}$

Applichiamo quindi la legge di perdita di propagazione per la frequenza di 20 KHz, 10 e 3 kHz tramite la legge di propagazione di Thorpe Leroy (cfr. in particolare il modello ISA e ISAT nel lavoro di Doh Glotin et al 2014):

$$TL(r, f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f)r$$

in dB per km con

$$\alpha(f) = \frac{f^2}{0.9144} \left(\frac{0.1}{1 + f^2} + \frac{40}{4100 + f^2} \right)$$

e f in kHz.

Ecco la legge di attenuazione dB dei clic per LF e P0, in ascissa la distanza dalla sorgente, in ordinata l'attenuazione in dB.

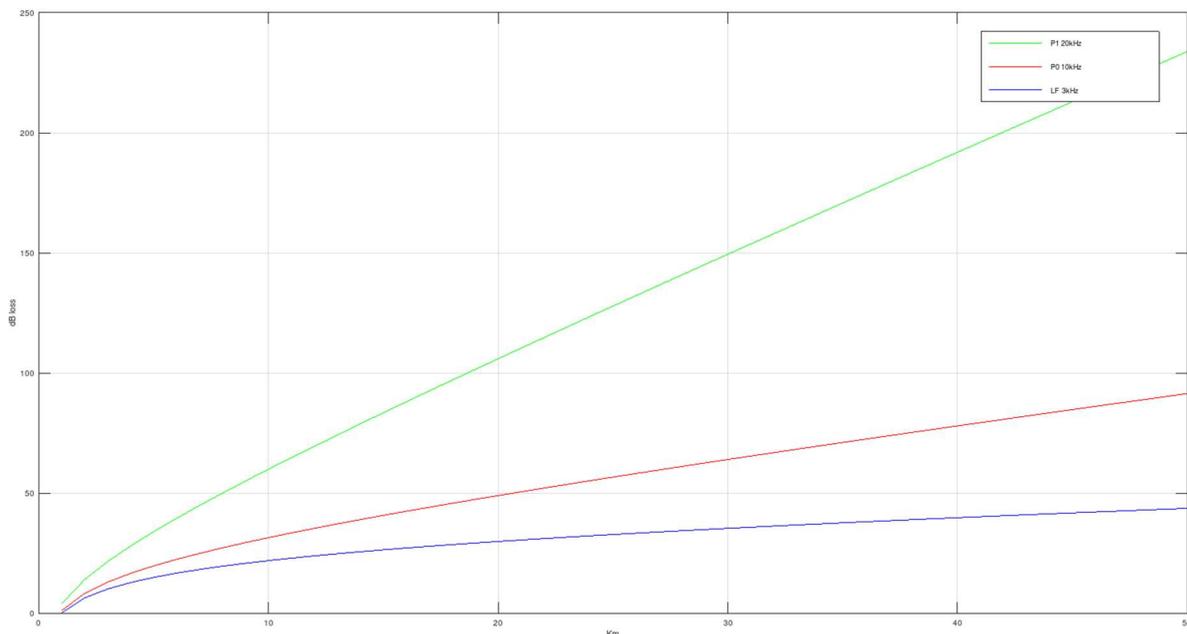


Figura: Perdita di trasmissione in dB di clic a LF 3 kHz e 10 kHz e 20 kHz.

Sostituendo queste perdite e i livelli attesi delle analisi precedenti, si può stimare che il capodoglio si trovi a una distanza compresa tra 3 e 5 km da Bombyx. Per confortare questa stima, misuriamo nella sezione successiva le quote e il raggio di rilevazione per semplice ipotesi di trasmissione lineare dei click (ovvero abbastanza stretto intorno ai 20 kHz). Riprendiamo quindi le misurazioni dei ritardi sotto.

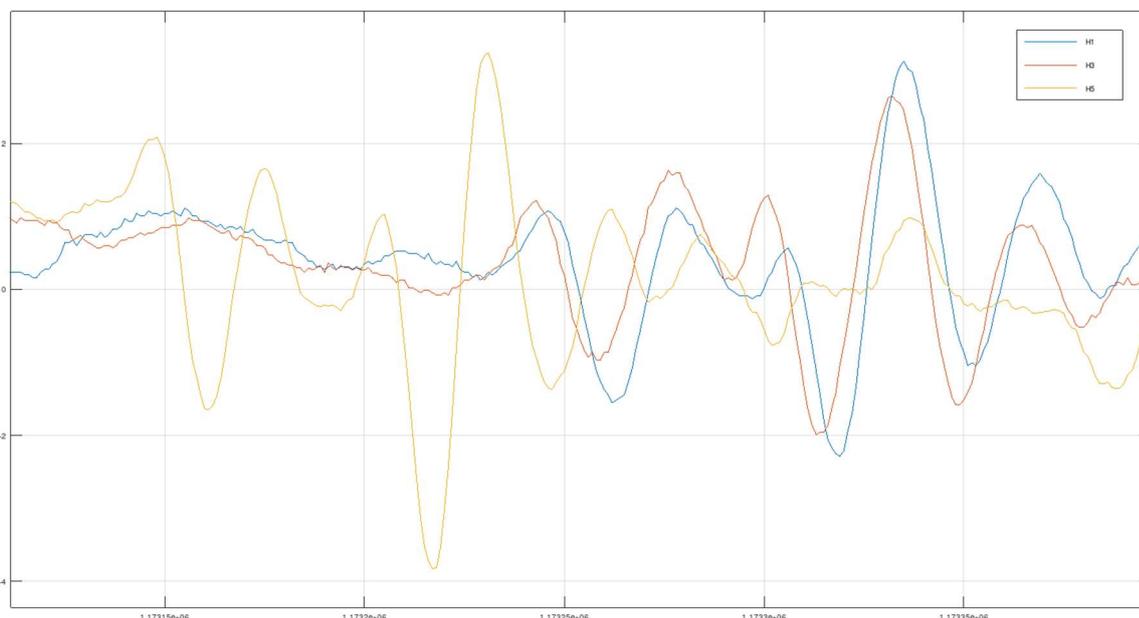


Figura: gli impulsi del capodoglio al secondo 168 sui canali 1, 3 e 5, che mostrano picco a picco un ritardo di arrivo $TDoA(5.1) = 110/256$ ms e $TDOA(3.1) = 10/256$ ms, dal 3 agosto alle 12:09

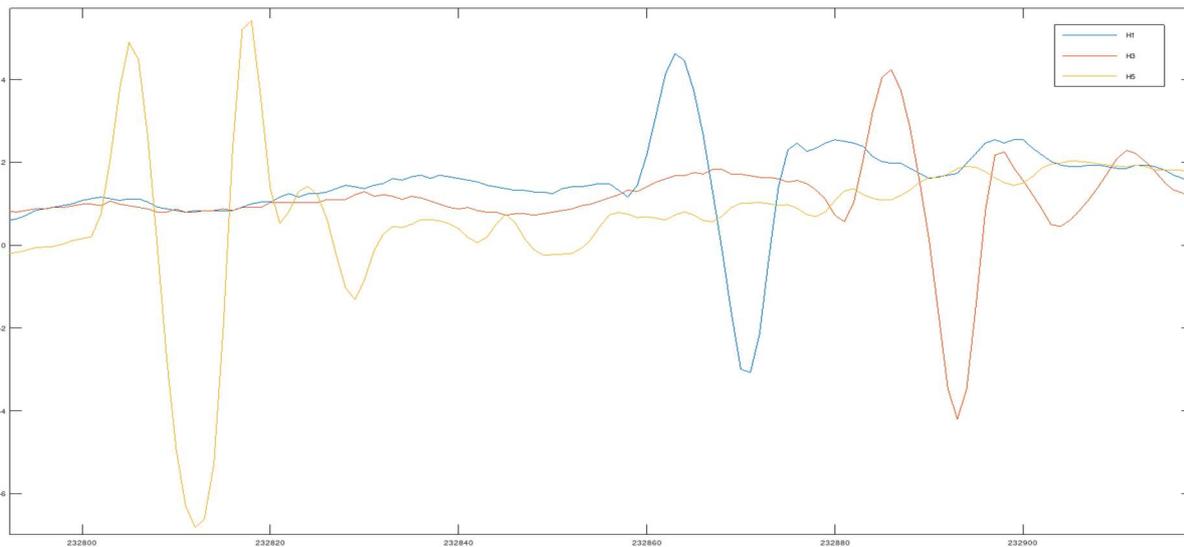


Figura: impulsi del capodoglio al secondo 242 sui canali 1, 3 e 5, che mostrano $TDoA(5,1)=58/256$ ms e $TDOA(1,3)=24/256$ ms, dal 3 agosto alle 12:09

H5 è verticale al punto medio tra H1 e H3 e Bombyx è verticale, il tempo di ritardo medio sull'antenna verticale è di 105/256 ms a 168 secondi e di 70/256 ms a 242 secondi.

Deduciamo questo sistema prendendo la quota calcolata sui 5 idrofoni, e questa differenza media sull'asse verticale di altezza $H=1212$ cm tra gli idrofoni.

Al secondo 168: $e1 = \text{quota } -20^\circ$
 Al secondo 242: $e2 = \text{quota } -5^\circ$

La differenza nella distanza percorsa è
 $dr = H \cdot \sin(\text{elevazione})$.

Con i ritardi misurati in precedenza, troviamo le seguenti elevazioni relative (senza correzione della MPU):

$$e1 = \text{asin}(1.500 \cdot 105 / 206 / 1.212) / 2 / \pi \cdot 360 = 40^\circ$$

$$e2 = \text{asin}(1.500 \cdot 70 / 206 / 1.212) / 2 / \pi \cdot 360 = 25^\circ$$

Troviamo quindi la stessa differenza misurata dal risolutore lineare su tutti i ritardi: $(e2 - e1) = 40 - 25 = 15^\circ = 20 - 5$. Questo conferma queste stime di variazione di elevazione.

Pertanto, considerando la velocità di ascensione del capodoglio compresa tra 2 m/s e 4 m/s (Glotin et al 2021) e considerando che il capodoglio evolve poco in raggio ma soprattutto in verticale tra 168 e 242 secondi, allora percorre una verticale V tra $150 \text{ m} < V < 300 \text{ m}$.

Poiché approssimiamo $V = D \cdot (e2 - e1)$ con D la distanza Bombyx dal capodoglio, abbiamo $600 = 150 / (2 \cdot \pi \cdot 15 / 360) < D < 300 / (2 \cdot \pi \cdot 15 / 360) < 1200 \text{ m}$

Questa stima di D , mediamente pari a $\frac{1}{2}$ miglio, è compatibile con le stime per stima delle perdite in dB della sezione precedente e sono quindi confermate.

Qualità dei rilevamenti di balene

Ricordiamo di seguito la natura degli impulsi delle balenottere e mostriamo con l'esempio la buona qualità di tali rilevamenti.

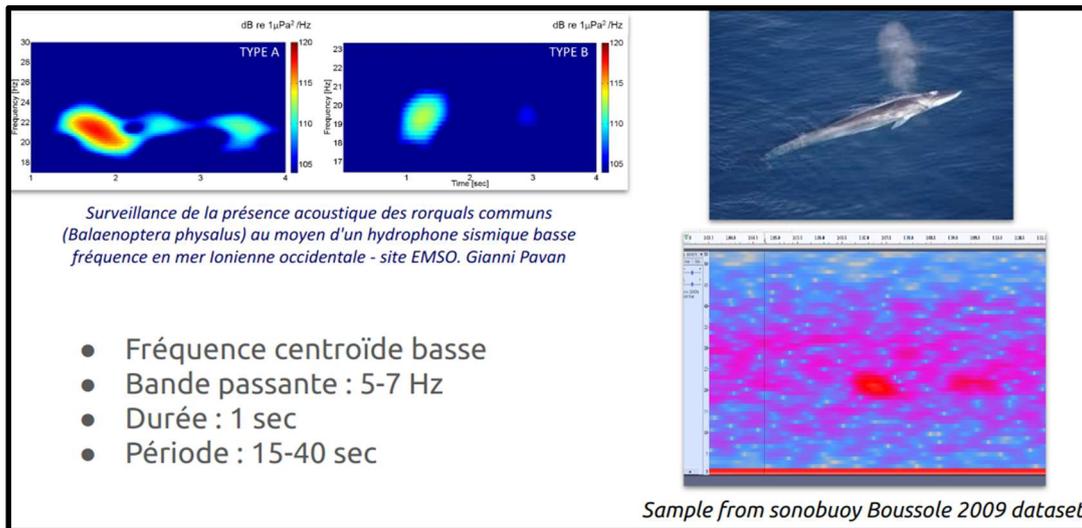


Figura: promemoria delle frequenze dei polsi della balenottera comune

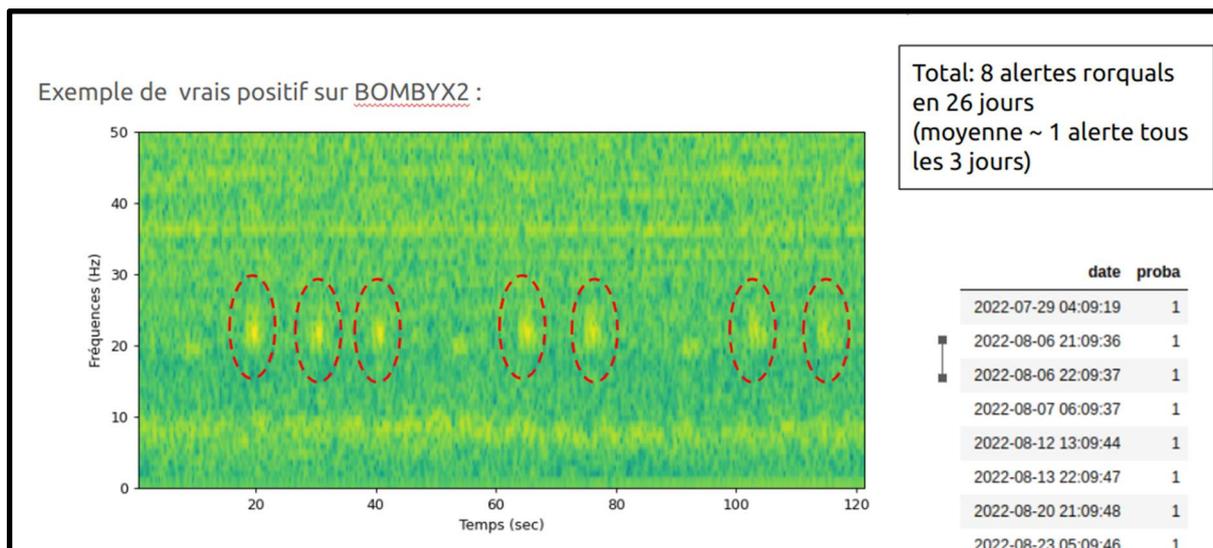


Figura: esempio di rilevamento dell'impulso di balenottera comune su Bombyx2

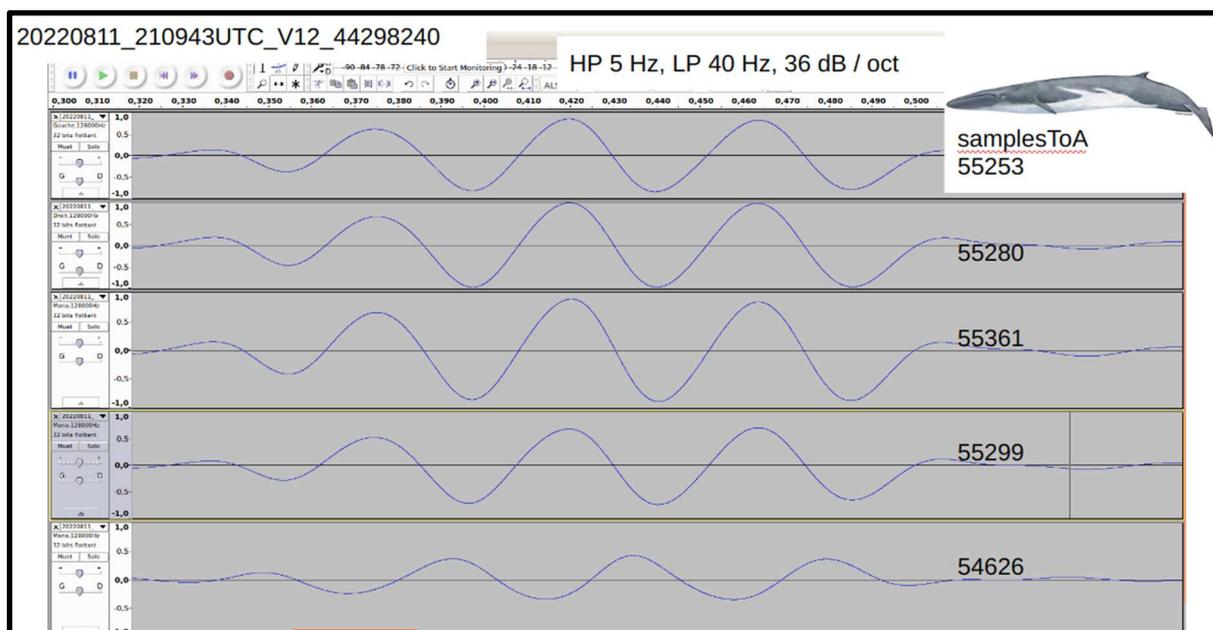


Figura: zoom su un polso di balenottera comune rilevato da Bombyx2 l'11 agosto 2022

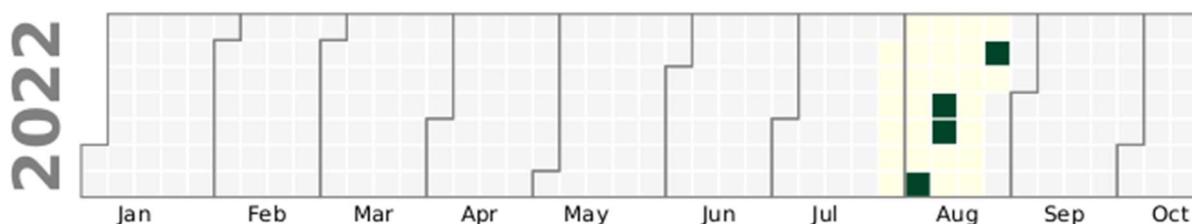


Figura: calendario dei rilevamenti di BOMBYX2.1 e BOMBYX2.2 estate 2022 di balenottere

URL ai suoni dei rilevamenti di balene

- 🔊 [20220807_060937UTC_V12.wav](#)
- 🔊 [20220811_080942UTC_V12.wav](#)
- 🔊 [20220812_130944UTC_V12.wav](#)
- 🔊 [20220823_050946UTC_V12.wav](#)
- 🔊 [20221202_160006UTC_V12.wav](#)
- 🔊 [20221205_130006UTC_V12.wav](#)

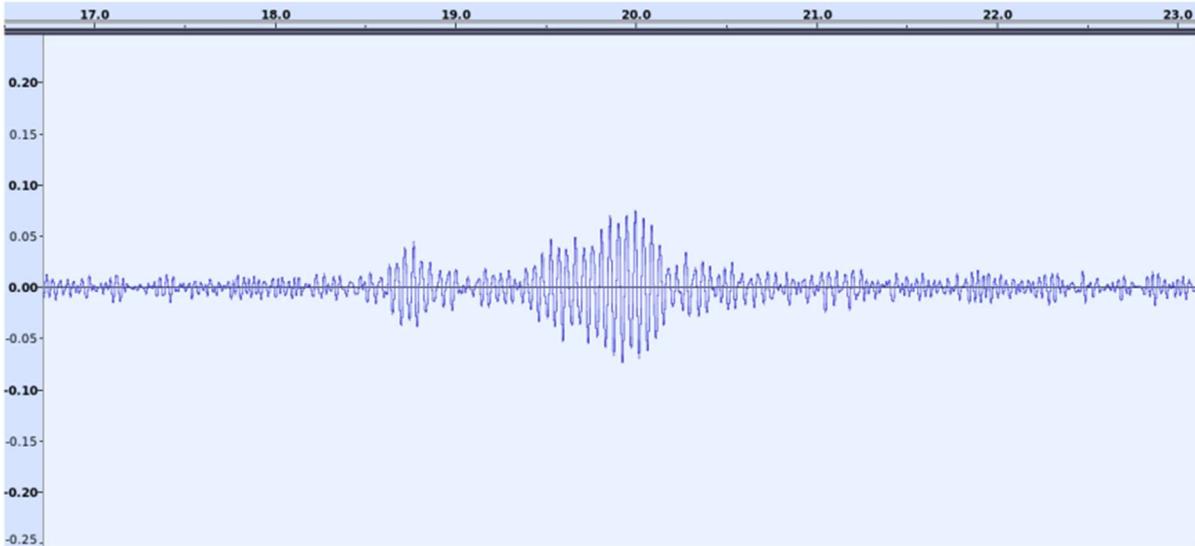


Figura: esempio di polso di balenottera comune registrato nell'estate 2022 da BX2 (ora, ampiezza)

Ci occupiamo poi della rivelazione di impulsi delle balenottere mediante wavelet e Apprendimento del rinforzo AI per stimare i livelli di dB.

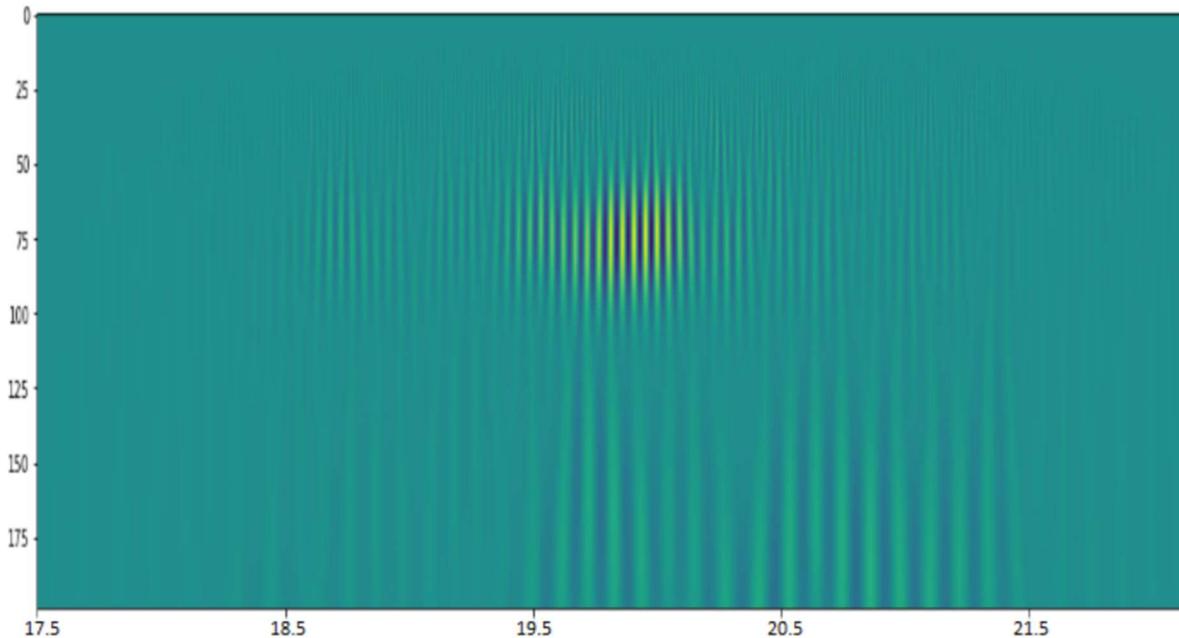


Figura: esempio di decomposizione wavelet di un polso di balenottera comune registrato in estate 2022 di BX2 (tempo, quefreny)

Stima della posizione e del raggio di rilevamento della balena

Riportiamo di seguito un esempio di semplice analisi degli angoli di arrivo degli impulsi balenottera comune di Bombyx2. Questo compito non è così semplice come per il capodoglio del fatto di interferenza con l'eco di superficie, la lunghezza d'onda dell'impulso della balena essendo dello stesso ordine di grandezza della profondità di Bombyx2.

20220811_210943UTC_V12_44298240

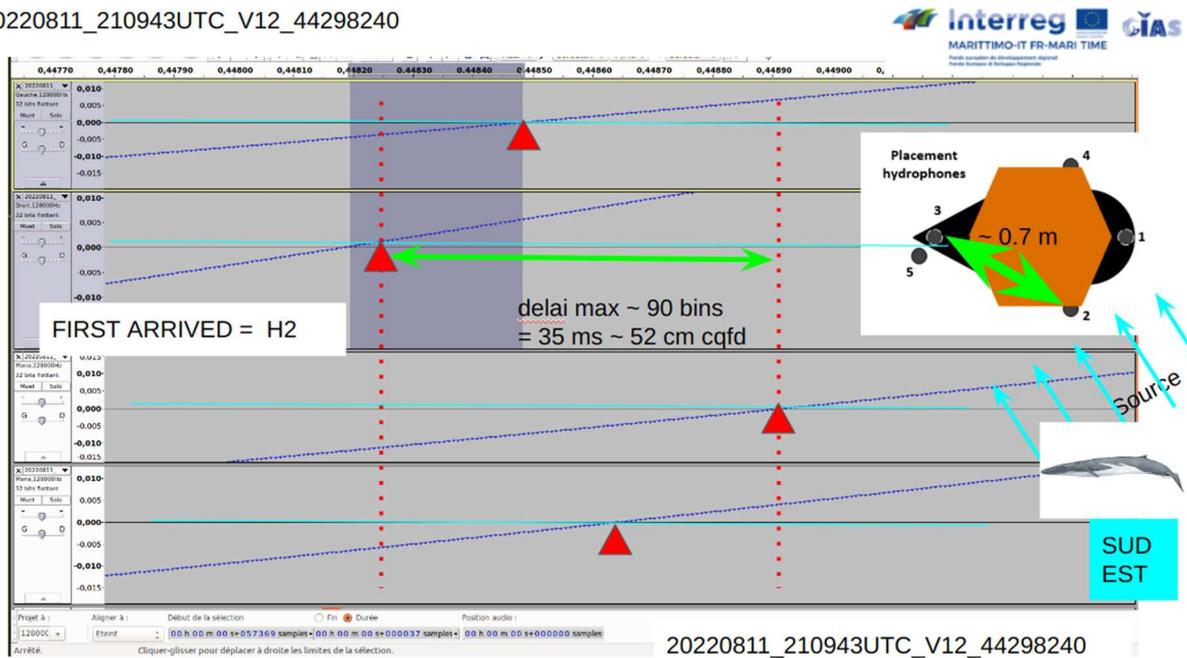


Figura: rappresentazione degli arrivi in transito in 0 del polso di balenottera comune da stimare gli angoli di arrivo, azimuth ed elevazione della balena

Completiamo questa analisi stimando e osservazione di Perdita in dB degli impulsi normali:

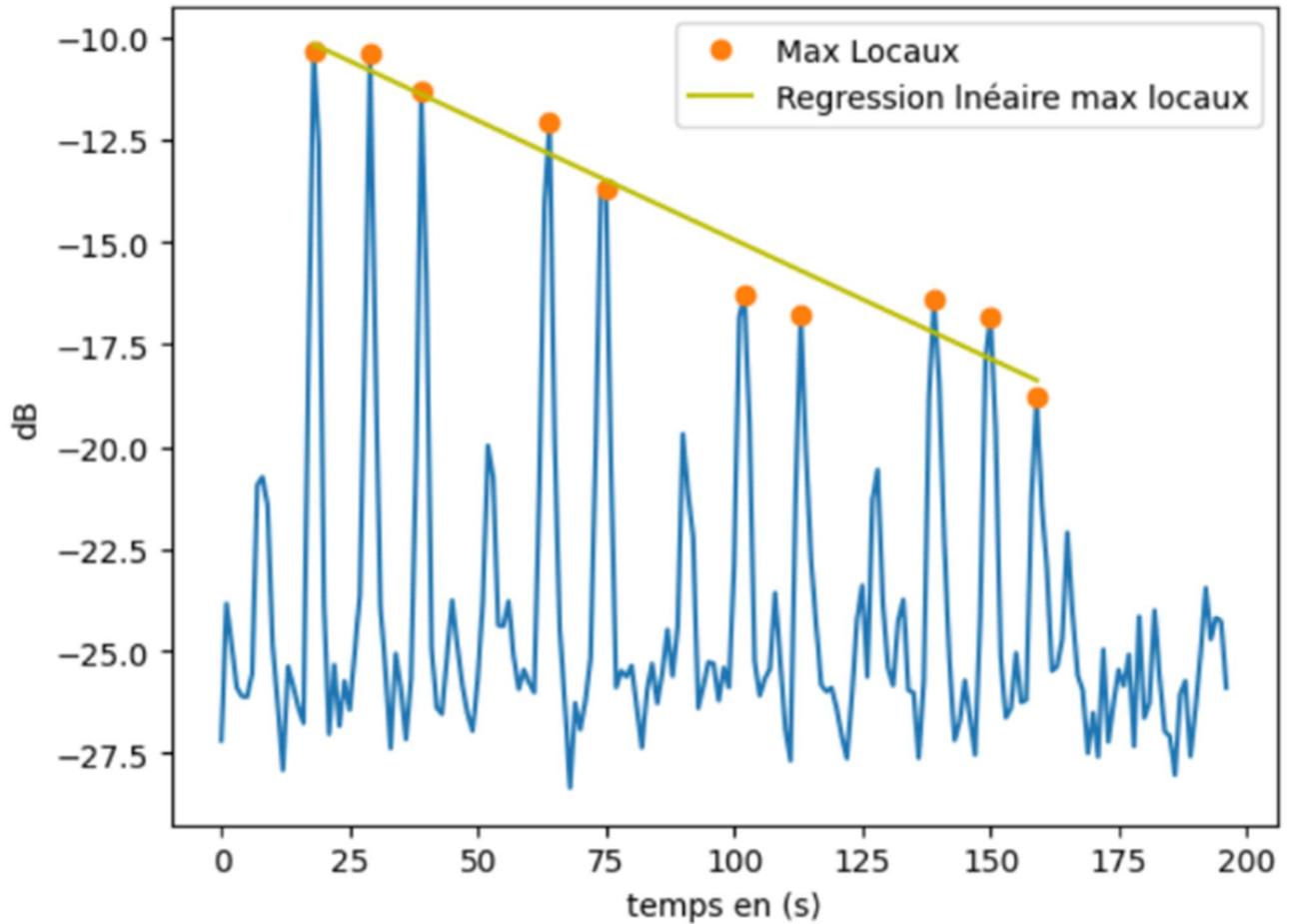


Figura: misurazione del movimento di una balena in 3 minuti e 10 impulsi di balena rilasciato. Bombyx misura la loro attenuazione in dB dell'ordine di 7 dB, cioè un livello acustica divisa per 2. Si tratta quindi di una traiettoria ad alta velocità radiale, a animale che si sposta al largo, quindi con un alto rischio di attraversamento della rotta del mare. Esempio del 29 luglio 2022

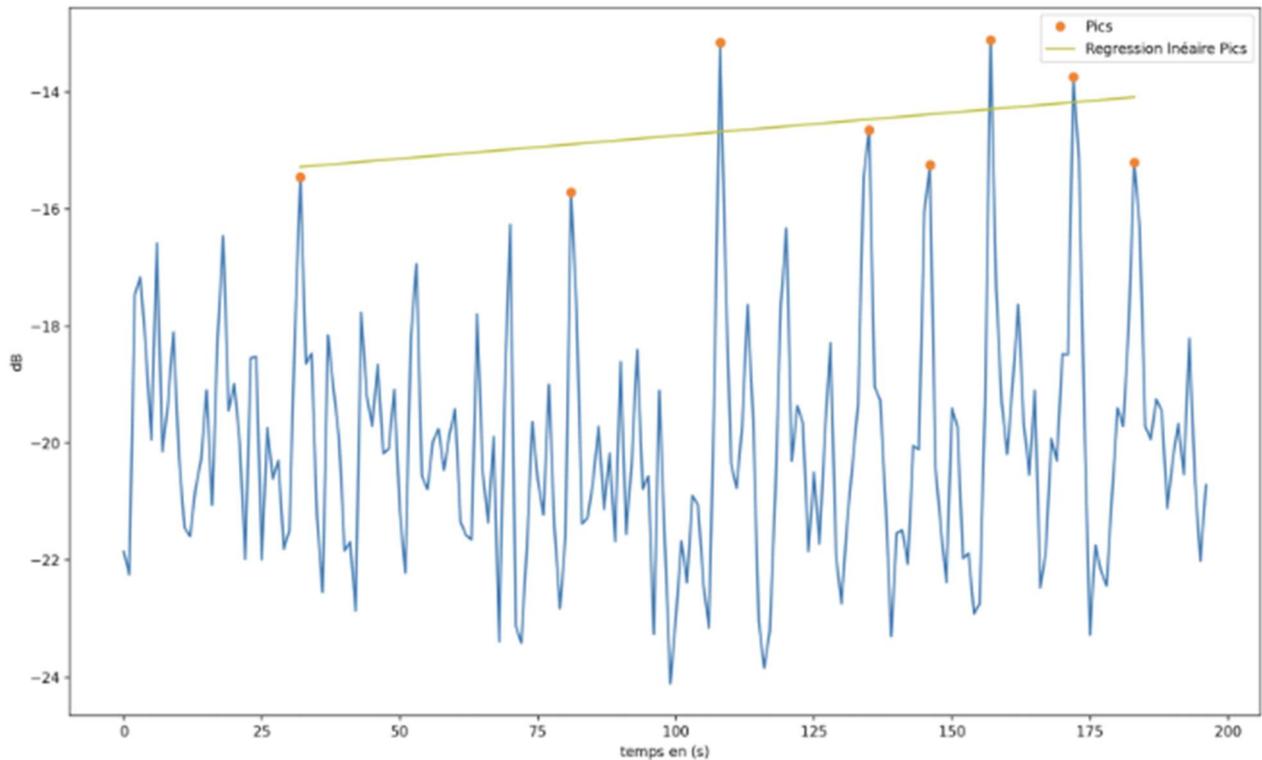


Figura: misurazione del movimento di una balena in 3 minuti e 8 impulsi di balena esempio del 23 agosto 2022.

Stima della distanza della balenottera

La legge di propagazione di Thorpe Leroy e la stima della distanza tra la balena e Bombyx2

$$TL(r, f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f)r$$

in dB per km con

$$\alpha(f) = \frac{f^2}{0.9144} \left(\frac{0.1}{1 + f^2} + \frac{40}{4100 + f^2} \right)$$

e f in kHz (qui f = 0,02 kHz).

Legge di attenuazione in dB degli impulsi di balenottera comune (20 Hz), in ascissa la distanza dal sorgente, in ordinata l'attenuazione in dB.

Considerando la velocità media della balena, apprendiamo con altri parametri, qual è la distanza più probabile dall'animale e che corrisponde al gradiente di perdita di dB misurato durante il passaggio della balena.

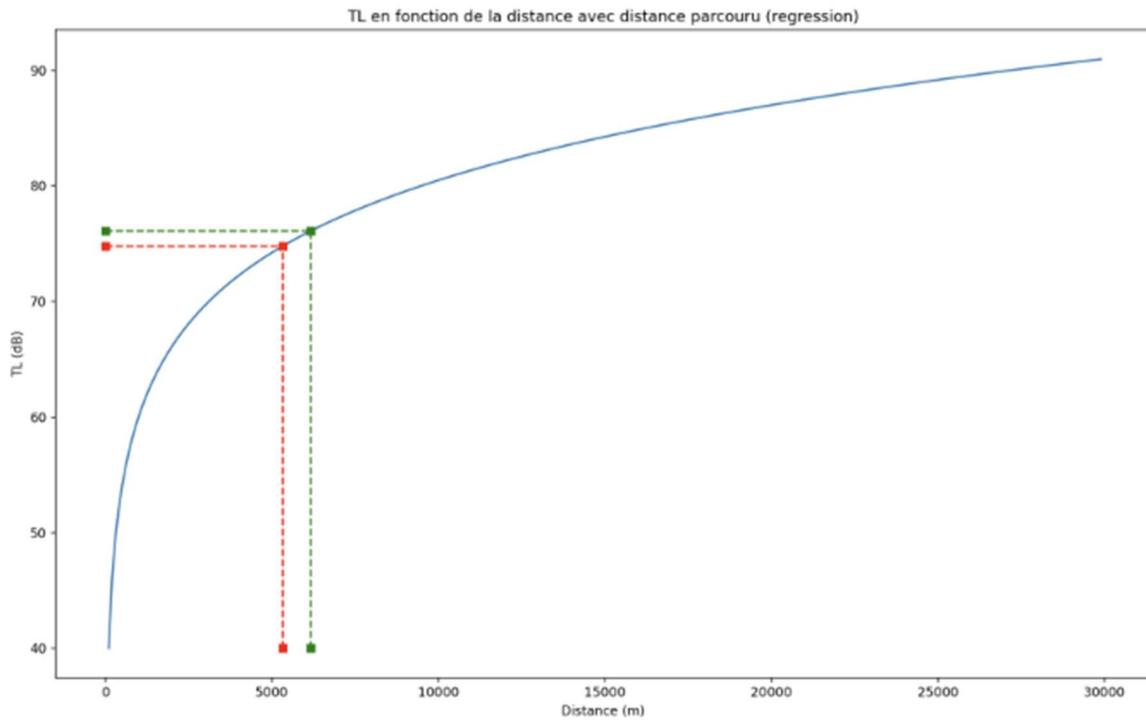


Figura: Legge di attenuazione in dB degli impulsi di balenottera comune (20 Hz), in ascissa la distanza da la sorgente, lungo l'ordinata l'attenuazione in dB.

Considerando la velocità media della balena, stimiamo che la distanza corrispondente alla dinamica di scorrimento delle rilevazioni è compatibile con una distanza di circa 5 km.

Valutazione, rapporto e decisione dell'avviso di collisione

Logs each 5 minutes rec, 10 Mo :

File Name	Time	Value
20220728_000918UTC_V12.wav	160	0.3529639
20220728_000918UTC_V12.wav	165	0.017730286
20220728_000918UTC_V12.wav	170	0.343511
20220728_000918UTC_V12.wav	175	0.03539723
20220728_000918UTC_V12.wav	180	0.08584233
20220728_000918UTC_V12.wav	185	0.917102
20220728_000918UTC_V12.wav	190	0.07624311
20220728_000918UTC_V12.wav	195	0.9999893
20220728_000918UTC_V12.wav	200	0.99990165
20220728_000918UTC_V12.wav	205	0.9406052
20220728_000918UTC_V12.wav	210	0.9485358
20220728_000918UTC_V12.wav	215	0.5486088
20220728_000918UTC_V12.wav	220	0.9581965
20220728_000918UTC_V12.wav	225	0.054285493
20220728_000918UTC_V12.wav	230	0.15936567
20220728_000918UTC_V12.wav	235	0.6549609
20220728_000918UTC_V12.wav	240	0.07359292
20220728_000918UTC_V12.wav	245	0.08724517

Fin/Phy.log
 t1 p1
 t2 p2
 ...
 tn pn

Figura: esempio di report di decisione/avviso generato automaticamente dalla scheda QHB e rispedito tramite 4G al laboratorio con campioni sonori per calcoli più precisi.

Rapporti di avviso, che consentono calcoli presentati in questa recensione, vengono ricevuti in laboratorio dalle due boe Bombyx2. Quindi i segnali confermati vengono presentati su una mappa online per le autorità, che sarà affinato, e che per la fine del progetto è nella forma presentata nella sezione prossima.

Mappatura dinamica, prototipo

Questa cartografia è stata sviluppata dal nostro team all'interno del progetto GIAS sovrapponendo in tempo reale sia l' AIS delle imbarcazioni che lo stato del mare che sono i due contesti per giudicare l'allerta di collisione con la presenza di cetacei. In caso di presenza di cetacei nel settore del disco con un raggio di 25 km, vengono stimate la rotta e la distanza dell'animale. In caso di rilevamento basso oltre i 25 km, Bombyx2 viene avvisato per un ascolto più lungo.

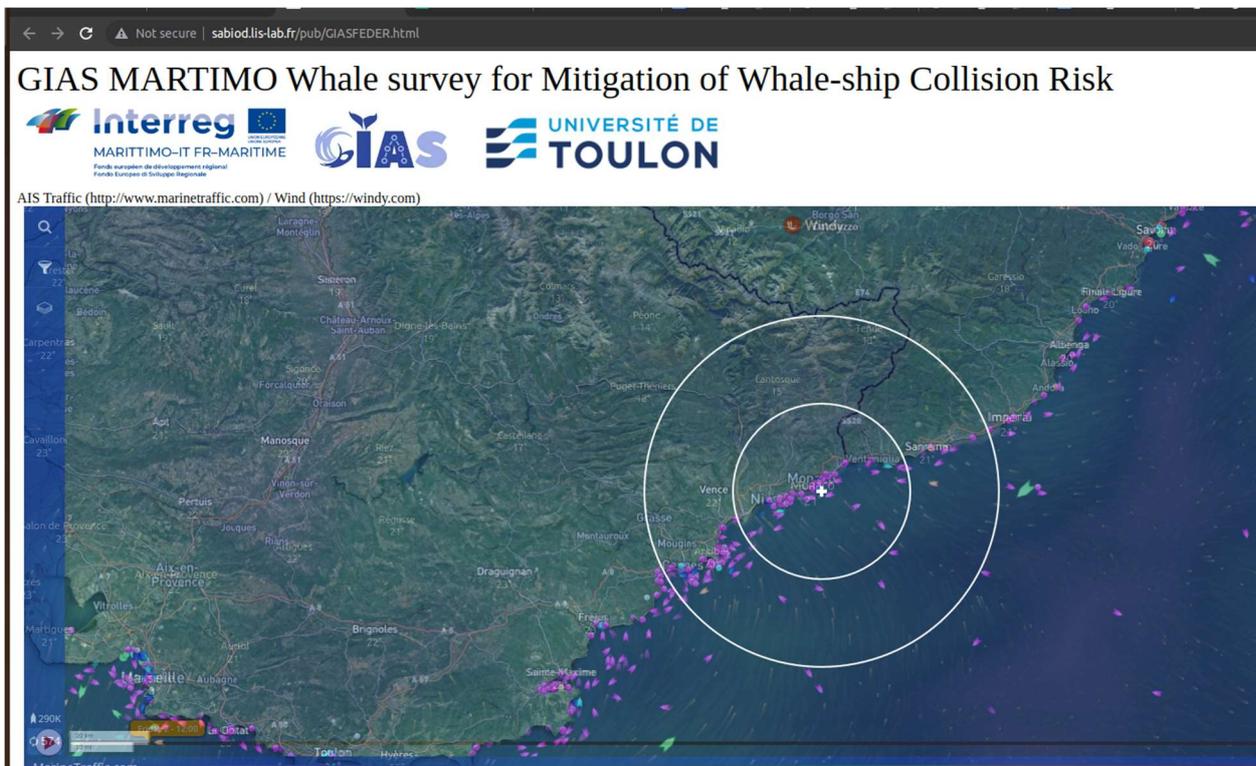


Figura: l'interfaccia del sito web con <http://sabiody.lis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html> .
 sovrapponendo in tempo reale sia l'AIS delle imbarcazioni che lo stato del mare che sono i due contesti
 per giudicare l'allerta di collisione con la presenza di cetacei.

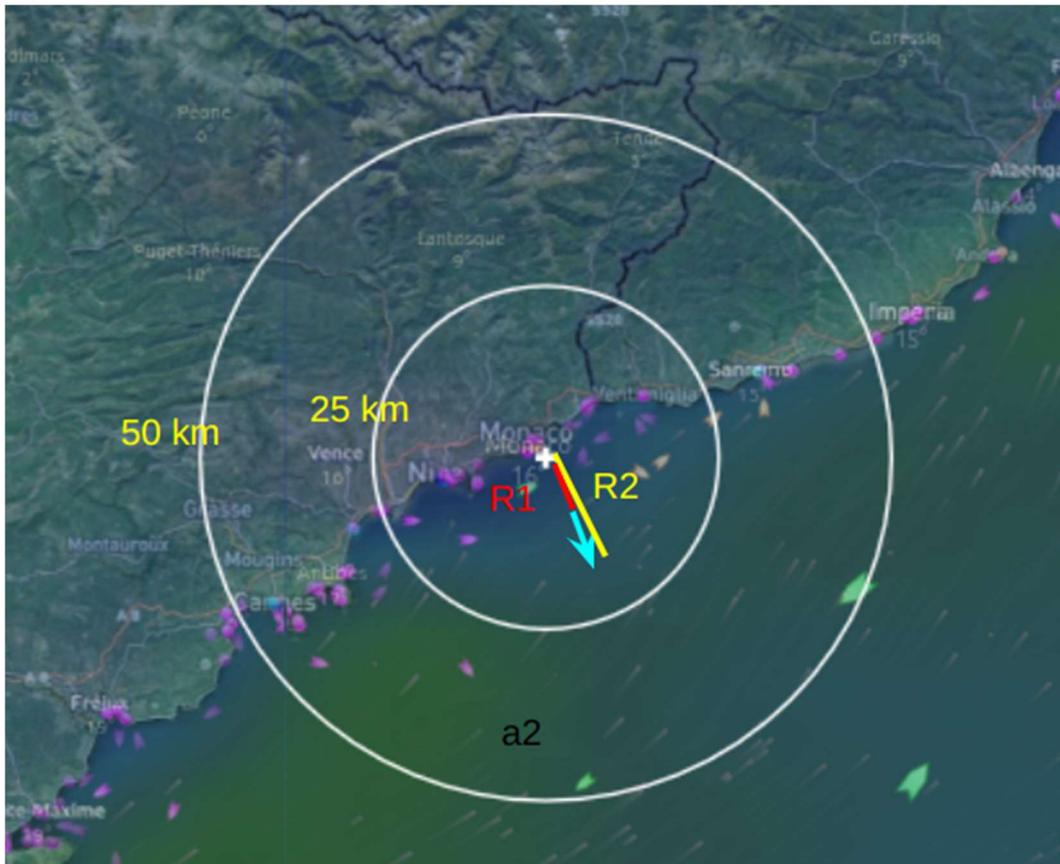


Figura: esempio di stima della posizione delle balene il 29 luglio 2022 e il suo movimento <http://sabiodylis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html>

L'interfaccia disponibile online qui: <http://sabiodylis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html>

Apprendimento continuo della funzione AI di avviso anticollisione

Dall'estate del 2022, questo osservatorio GIAS è stato schierato con le prime 2 boe a Monaco. In effetti, il sindacato della pesca di Cap Martin ha successivamente richiesto vincoli non compatibili con il funzionamento di Bombyx2. Anche la seconda boa Bombyx sta ruotando con la prima boa come indicato sulla mappa.

Questa configurazione di accoppiamento delle due boe è di grande interesse per il miglioramento dell'apprendimento AI a bordo della boa per affinare e confermare la stima della distanza dell'animale.

Infatti le misure congiunte di due boe consentono da un lato una manutenzione a rotazione di manutenzione più rapida per il cambio delle batterie e un miglioramento di una boa quando un'altra è in acqua. Il dispiegamento è quindi congiunto con le due boe in funzione contemporaneamente. Vale a dire che si incrociano gli angoli di arrivo delle sorgenti in azimuth, stimati dalle boe B1 e B2 per stimare la posizione della sorgente.

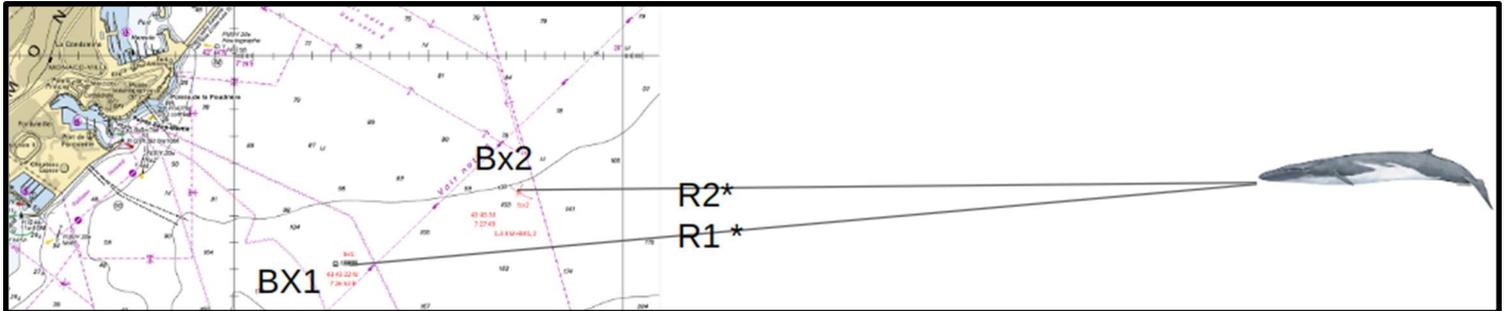


Figura: illustrazione dell'incrocio di due azimuth stimati, uno da BX21, e l'altro dall'altra boa Bombyx BX22. Questi due azimuth si intersecano, fornendo una stima accurata della posizione dell'animale e della sua distanza R2* e R1*.

Da quel momento in poi lo stimatore di distanza dopo molte di queste stime viene addestrato a stimare R1* solo con la boa BX21. E R2* solo con BX22.

La formulazione di questo apprendimento è quindi di questa forma, dove DNN è una rete neurale profonda, $ILD(B_i)$ è l'insieme delle differenze di intensità del segnale percepito dalla boa B_i ,

$$AI_learning_cost_function = (DNN(ILD(Bx1), TDoA(Bx1), sfasamento(Bx1)) - R1^*)^2 + (DNN(ILD(Bx2), TDoA(Bx2), sfasamento(Bx2)) - R2^*)^2$$

Discussione e conclusione

Questa rete Bombyx2 LIS UTLN composta da boe acustiche intelligenti del LIS DYNI è un'innovazione a livello internazionale. È infatti la prima rete al mondo a consentire un ascolto bioacustico e acustico di qualità in genere nel sottosuolo, al riparo dalle intemperie e senza interferenze del traffico marittimo. Ogni boa della rete è inoltre in grado di risalire in superficie con la propria zavorra per inviare al server e ai gestori dell'UTLN le segnalazioni di rilevamento dei bersagli (cetacei). Questo rapporto viene calcolato in completa autonomia grazie all'IA di bordo della boa. Le boe tra di loro possono anche comunicare tramite il nostro server UTLN. Quindi una boa A che rileva un evento, invia un messaggio al nostro server LIS UTLN, che può quindi inviare ordini o indicazioni di vigilanza o configurazione rispetto a determinati obiettivi, alle boe vicine di A quando vengono in superficie.

Il progetto GIAS che si sta concludendo ha avviato un sistema unico al mondo e successivi progetti ne consentirebbero il potenziamento.



Figura: Gruppo di tre capodogli che socializzano in superficie, misurano tra i 10 e i 16 metri di lunghezza e si nutrono di diverse centinaia di chilogrammi di calamari al giorno.

http://sabiod.lis-lab.fr/pub/SPHYRNA/PHOTOS/VF_S_cachalots_groupe.png (credito F. Sarano)

GIAS UTLN innova su questo tema del monitoraggio degli ecoscandagli, dei capodogli e dei grandi cantori del Mar Mediterraneo (balenottere). È anche un efficace monitoraggio dell'antropofonia che è una ricerca prioritaria per la Commissione europea per quanto riguarda l'evoluzione dell'ambiente marittimo e delle sue risorse alieutiche. Si tratta quindi di un'esigenza in linea con le esigenze del ministero, PREMAR, SHOM, DGA, in particolare.

A più lungo termine, per ridurre la perdita di biodiversità osservata sul pianeta, è essenziale valutare i suoi cambiamenti, il che richiede una migliore osservazione degli ecosistemi. Il monitoraggio acustico passivo (ascoltare vocalizzazioni animali, biosonar o click senza interferire con essi) consente di campionare meglio i diversi gruppi di animali selvatici. Se i sistemi di monitoraggio sono ormai praticamente operativi per il monitoraggio di alcuni taxa, rimangono aperte questioni riguardanti la digitalizzazione e l'elaborazione di masse di dati bioacustici. È fondamentale poter osservare la biodiversità su grandi serie temporali, ampie bande di frequenza e grandi superfici o volumi di ambienti naturali selvaggi, spesso poco accessibili o campionati. Il nostro approccio, che chiamiamo "etoacustica", permette di analizzare le comportamenti delle specie attraverso l'acustica, richiede l'installazione negli ecosistemi di antenne di sensori acustici sincroni e l'ottimizzazione di algoritmi attraverso l'intelligenza artificiale (AI), per riconoscere e analizzare il comportamento degli animali che vocalizzano o fanno clic.

In pratica, le aree da studiare sono intervallate da una rete di sensori intelligenti distribuiti a basso costo, a basso consumo e possibilmente sincronizzati. Insieme alle rappresentazioni del segnale appreso dagli algoritmi AI, questa rete mira a essere in grado di rilevare, localizzare, quantificare e classificare i taxa animali che vocalizzano, senza disturbarli. Questo permette anche di migliorare la nostra conoscenza degli ambienti marini, soprattutto intorno alle falesie o nei profondi canyon a ridosso delle coste antropizzate. Lì si formano fronti oceanici (movimenti verticali della colonna d'acqua), creando complesse dinamiche che alimentano la catena alimentare, dal plancton ai superpredatori, compresi i mammiferi marini.

Nel Mediterraneo il sistema riguarda in particolare la megafauna (capodoglio, globicefalo, balenottera comune, ecc.). Queste specie fragili, spesso minacciate, sono buoni indicatori dello stato di salute di questo ecosistema, perché ci possono essere grandi cetacei in abbondanza solo se l'ecosistema fornisce loro cibo a sufficienza. La diminuzione della loro popolazione è un'indicazione del degrado dell'ambiente e delle prede da cui dipendono.

Con lo sviluppo di strumentazione di precisione, oggetti connessi (*Internet delle cose*) e l'intelligenza artificiale, sorgono diverse domande. Dove e quando distribuire i sensori? E per quale prestazione? Per rispondere a questo, abbiamo scelto di simulare completamente il sistema: dalla generazione delle

traiettorie degli animali marini, integrando vincoli cinematici e comportamentali, alla catena di "classificazione, rilevamento, localizzazione", attraverso la modellazione della propagazione acustica. Questogioco serio genera, sul supercomputer nazionale Jean Zay, scenari realistici e accettabili. È una pietra angolare nello sviluppo dei nostri metodi e una base per il dispiegamento ottimale dei nostri osservatori. In effetti, è difficile creare veri e propri database acustici marini in quantità sufficiente per gli approcci AI. Gli algoritmi sviluppati hanno quindi lo scopo di aumentare la mole di dati, migliorare l'apprendimento della loro rappresentazione e perfezionare l'apprendimento delle leggi fisiche nell'acustica subacquea.

Inoltre, l'apprendimento delle rappresentazioni Tempo-Frequenza (TF) è centrale in queste ricerche, perché i segnali bioacustici sono ad alta risoluzione. La maggior parte delle reti neurali non osserva direttamente le serie temporali dei dati acustici, ma piuttosto una rappresentazione adattata. Per ottenere una migliore ottimizzazione della rappresentazione TF, abbiamo associato la distribuzione di Wigner-Ville con l'*apprendimento approfondito* del 2010. Il nostro approccio consente di discriminare meglio le diverse fonti in base al loro contenuto informativo nel tempo e nella frequenza. Questo approccio consente di eliminare il rumore dal segnale e quindi di localizzare e classificare meglio gli animali. Ci ha permesso di sviluppare il primo modello per il riconoscimento automatico dei suoni transienti bioacustici subacquei, dalla loro forma d'onda. Questo modello è utilizzato dall'Agenzia francese per la biodiversità per studiare i cetacei nell'arco caraibico. Stiamo monitorando anche le tracce di effetti Doppler, anche micro-Doppler, che verrebbero utilizzati dai cetacei.

In definitiva, questi metodi sviluppati grazie al progetto GIAS forniscono conoscenze sui titani invisibili degli oceani, come i capodogli, i più grandi predatori. Dieci anni fa, abbiamo posizionato una boa acustica stereofonica (Bombyx1), al largo di Port-Cros, di fronte a Tolone. Questo protocollo ha fornito 4 terabyte di dati e ha permesso di tracciare e contare i passaggi della megafauna (capodogli, balene) (Glotin et al, Poupard et al, Best et al.).

Le boe GIAS Bombyx2.1 e BOMBYX2.2 ora costruiscono corpora molto più ricchi perché con 5 idrofoni, catturano informazioni di scorrimento in azimuth, elevazione e con l'apprendimento AI in corso renderanno anche possibile la stima della distanza e la stima della distanza dell'errore.

Prospettive

L'esecuzione di questo programma GIAS BOMBYX dall'estate del 2022 è completata qualità e osservazioni precise in volumi di diversi chilometri cubi senza disturbare l'ecosistema. Le emissioni sonore sono vitali per i cetacei, non solo per comunicare, ma anche per localizzarsi e per cacciare. Questa estrema dipendenza acustica li rende vulnerabili all'inquinamento antropofonico causato dall'esplosione del traffico marittimo. I dati acustici acquisiti negli anni dalle reti di monitoraggio costituiscono un repository che consentirà di misurare la concomitante evoluzione dell'antropofonia e delle popolazioni di cetacei anche criptici.

Questa ricerca consente di rappresentare la dinamica e il comportamento dei cetacei sulla base dei loro vocalizzi o clic. La fine risoluzione delle misurazioni di Bombyx2 sembra mostrare, ad esempio, che i capodogli costruiscono una rete di trasmettitori-ricevitori distanti circa 500 metri. Userebbero un principio di bio-multistatismo per cacciare: le informazioni generate dai sonar di ciascuno sarebbero condivise da tutti... come i sistemi di pesca subacquea umana. Dimostriamo così che questi capodogli rimangono per ore nei vortici formati dalle correnti, allungando il loro tempo di presenza nelle zone a rischio di collisione. Sarà quindi importante accoppiare la stima delle correnti marine negli avvisi anticollisione.

Inoltre, gli impulsi sonori (per analogia, vicini alle vocali negli esseri umani, segnale causato dalle vibrazioni delle corde vocali) di altre specie potrebbero trasportare informazioni di ecolocalizzazione e

firme individuali. Queste scoperte permettono di stabilire nuovi criteri di regolazione dell'antropofonia e dei sistemi anticollisione.

Questo osservatorio Bombyx2 basato sull'intelligenza artificiale partecipa a una nuova era dell'osservazione oceanica, a vantaggio della prevenzione dell'antropofonia e del rischio di collisione.



Figura: Posizione delle cacce 3D calcolate dall'acustica passiva dalla superficie di un branco di 6 capodogli al largo della secca di Mejean, vicino a Monaco, il 14 gennaio 2020 misurata da un'antenna acustica identica a Bombyx2. Questi predatori rimangono centrati per tre ore attorno a un vortice, un fronte oceanico dove si agita una grande biomassa (disponibile su <https://cosphilog.fr/cachalots-musee/> e presentato al Museo di Storia Naturale del VAR nel 2023 dal GIAS UTLN)

Animazione 3D, con tracciamento di ogni individuo identificato dalla sua firma acustica indotta dalle dimensioni del suo organo di produzione acustica animazione online su <https://cosphilog.fr/cachalots-musee/>

Ogni capodoglio viene misurato dagli intervalli tra gli impulsi dei suoi clic. Di conseguenza, abbiamo rilevato per 3 ore, 4 individui da molto giovani ad adulti, chiamati per comodità Fanny, Marius, Norine, Honoré, César. In ogni momento della loro traccia, la profondità è indicata accanto al nome.

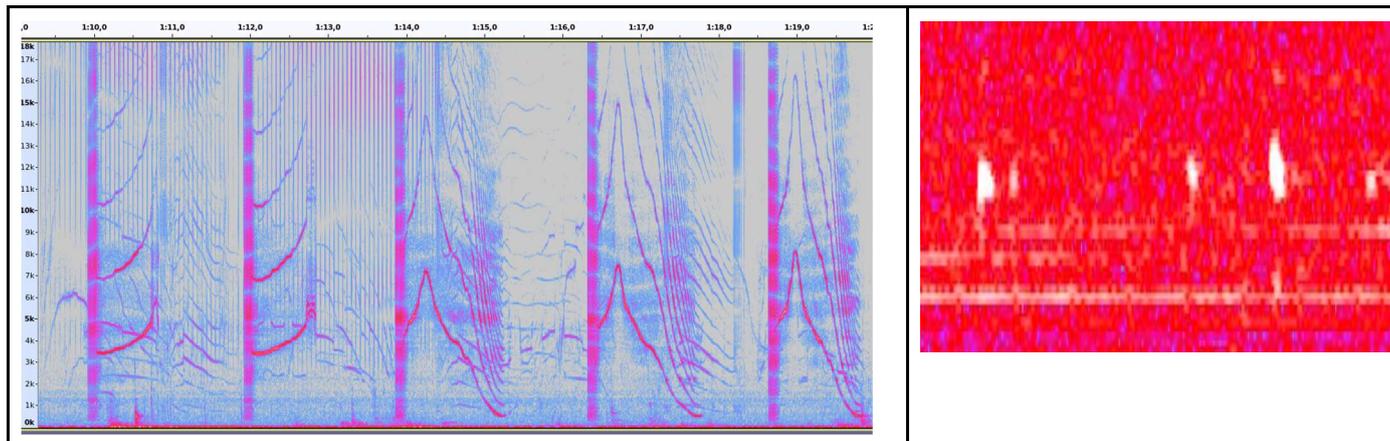


Figura: Esempio di vocalizzazioni. A sinistra: balene pilota vicino a Tolone nel 2020. L'ampio spettro di 20 kHz mostra la complessità dei dialetti. A destra: impulsi di balenottera comune registrati ai piedi di Porquerolle, a una profondità di 2,5 chilometri nel maggio 2020 (spettrogrammi da 0 a 40 Hz, 20s). Queste forme contengono informazioni sui clan che potrebbero essere identificate dall'intelligenza artificiale e collegate agli spostamenti di popolazione accelerati dal riscaldamento globale.

Possibile distribuzioni di rete BOMBYX

Il progetto europeo EUROPAM è stato presentato e finanzia altre 3 boe Bombyx2 nel 2023/2024 nel Mediterraneo ma anche nelle ACORES e in Norvegia.

Boa # (sito) (trasmissione)	Posizione GPS	profondità cadavere	de
Bx1 (Porquerolles) (4G)	42°57'49"N 6°15'20"E	-90 m	
Bx2 (Cap Corse) (4G)	42°48'15"N 9°31'19"E	-65 m	
Bx3 (Siciè) (4G)	43°01'11"N 5°49'34"E	-100 m	
Ax4 (Pamplonne) (4G)	43°13'16"N 6°47'00"E	-128 m	
Bx5 (Cap Martin) (4G)	43°43'41"N 7°30'36"E	-170 m	
Ax6 (Isola Rossa) (4G)	42°41'06"N 8°47'59"E	-190 m	
Bx7 (Antibes) (4G)	43°32'29"N 7°09'58"E	-140 m	

Bx8 (Ajaccio) (4G)	41°42'49"N 8°37'38"E	-100 m
Bx9 (Banc Bagaud) (Iridio)	43°02'32"N 6°38'23"E	-115 m
Bx10 (Mont Mejean) (Iridio)	43°23'55"N 7°08'44"E	-350 mt
Bx11 (Cassis) (4G)	43°08'47"N 5°30'08"E	-115 m
Bx12 (Porto Vecchio)	41°38'06"N 9°27'00"E	-90 m

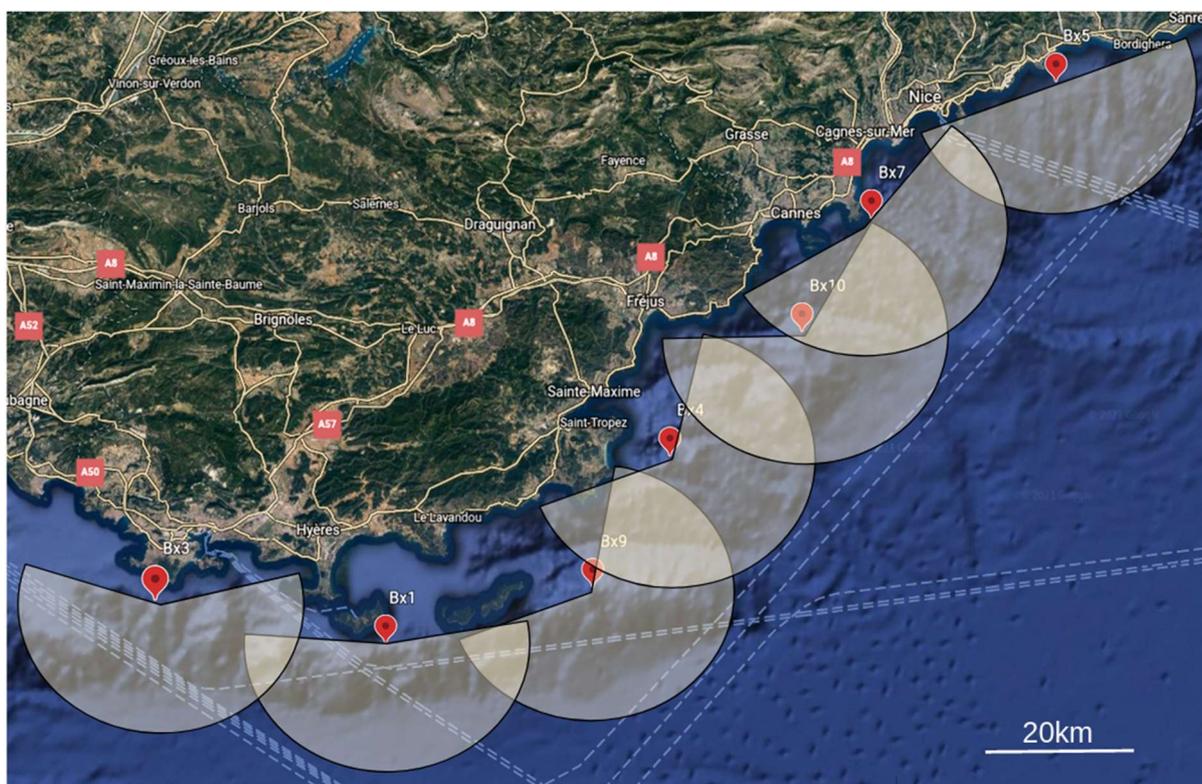


Figura: Mappa della posizione delle boe Bx1, Bx3, Bx9, Bx10, Bx7, Bx5 con il suo raggio di ascolto massimo di 20 km

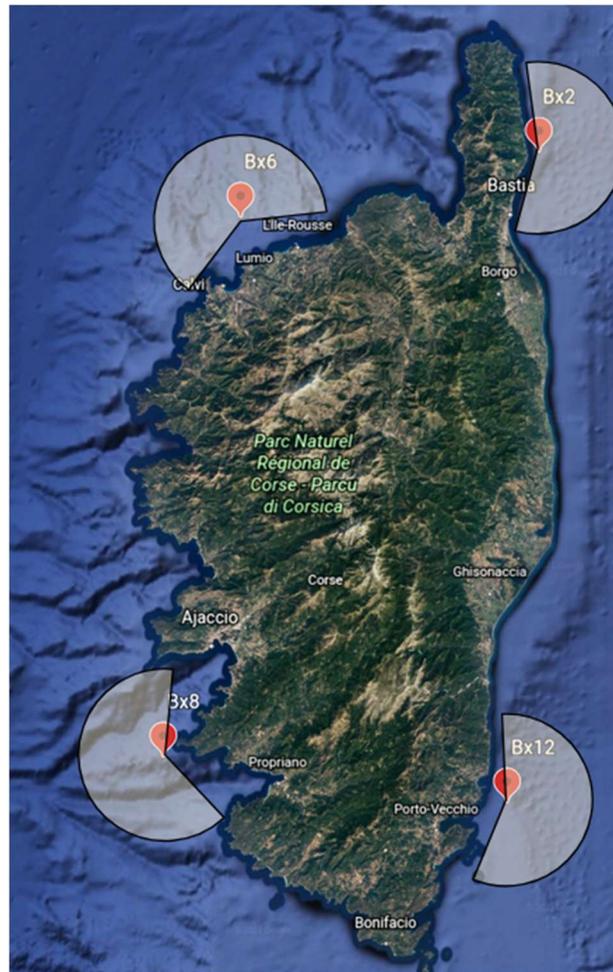


Figura: Mappa di posizionamento delle boe corse Bx2, Bx6, Bx8, Bx12 con il loro raggio di ascolto massimo di 20 km

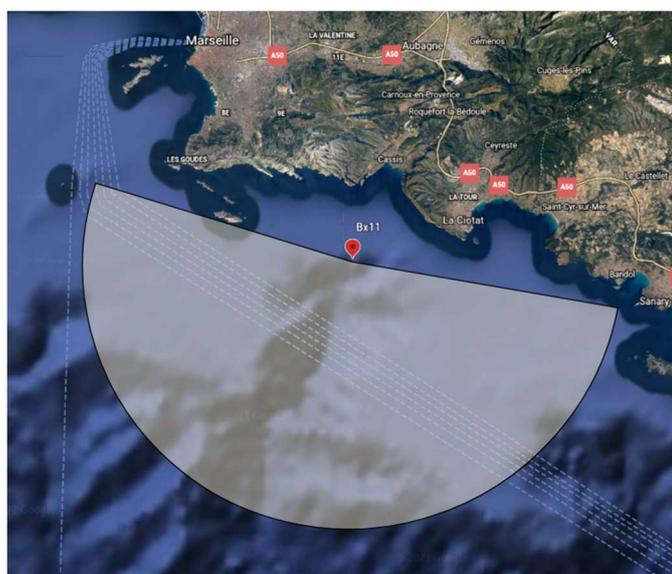


Figura: Mappa di posizionamento di Bx11 (Cassis) con il suo raggio di ascolto massimo di 20 km

Bibliografia

Balestriero, H. Glotin, R. Baraniuk, 2021, "Super-risoluzione interpretabile tramite rappresentazione di serie temporali apprese", int. conf. Machine learning matematico e scientifico, <https://arxiv.org/abs/2006.07713>

Barchasz, V. Gies, S. Marzetti, H. Glotin, 2020, "Un nuovo DAQ accurato e preciso a bassa potenza e ad alta velocità con intelligenza artificiale incorporata per lo studio della biodiversità a lungo termine", Forum Acusticum 2020, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03230835/document>

Ferrari, H. Glotin, R. Marxer, M. Asch, 2020, "Docc10: set di dati ad accesso aperto di studi transitori sui mammiferi marini e classificazione della rete neurale convoluzionale end-to-end", int. Conf. sulle reti neurali, (IJCNN), <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02866091/document>

Glotin, N. Thellier, P. Best, M. Poupard, M. Ferrari et al., 2020, "SphyrnaOdyssey, Scientific Report, Ethoacoustic Discoveries of Collaborative Sperm Whale Hunts & Impacts at Sea of COVID19 Containment", LIS RR, <http://sabiiod.org/SO1.pdf>

Best, P., Marxer R., Paris S. e Glotin H. Evoluzione temporale del canto della balenottera comune nel Mediterraneo. Rapporto scientifico, Ed. Nature, 2022 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15379-0>

Poupard, M., Ferrari M., Best P., Glotin H. (2022), Monitoraggio acustico passivo di capodogli e rumore antropogenico mediante registrazioni stereofoniche nel Mar Mediterraneo, Santuario di North West Pelagos. In Rapporti scientifici, Nature Ed., <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05917-1>

Glotin H., Poupard M., Best P., Ferrari M. (2021). Osservazioni stereofoniche su 4 anni della boa BOMBYX a sud del Parco Nazionale di Port-Cros: Megafauna e inquinamento antropofonico. LOTTO 2: Il caso della balenottera e del globicefalo http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT2_rorqual_CNRS_BOMBYX.pdf

Glotin H., Poupard M., Best P., Ferrari M. (2021). Osservazioni stereofoniche su 4 anni della boa BOMBYX a sud del Parco Nazionale di Port-Cros: Megafauna e inquinamento antropofonico. LOTTO 1: Il caso del capodoglio http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT1_cachalot_CNRS_BOMBYX.pdf

Chaire IA Advanced UnderSea Intelligent Listening: ADSIL, 2020-24 <http://bioacoustics.lis-lab.fr>

La bioacustica dei capodogli, rapporto CNRS: https://www.youtube.com/watch?v=g3xXM_tycCU

Walter M. X. Zimmer, Peter L. Tyack, Mark P. Johnson e Peter T. Madsen, Lo schema del raggio tridimensionale dei clic regolari del capodoglio conferma l'ipotesi del corno piegato, JASA 2005

Glossario

Antropofonia. Tutti i rumori prodotti dall'uomo o dalle sue tecnologie (parola, rumore del motore, sirena, turbina, turbina eolica). Una sorgente acustica essendo caratterizzata dalla sua durata, dalla sua frequenza e dalla sua intensità.

Biosonar (o clic). Breve segnale prodotto il più delle volte da un mammifero, marino o terrestre, ottimizzato per produrre un'eco su un volume, una preda, e per fornire informazioni su questo target all'animale emittente.

Etoacustica. L'analisi del comportamento degli animali mediante l'acustica e l'analisi fine delle forme delle loro vocalizzazioni o biosonar grazie all'intelligenza artificiale.

Intelligenza artificiale (IA). Rilevamento automatico del taxon (specie) o algoritmo di classificazione ottimizzato mediante l'apprendimento su una base di riferimento nel caso supervisionato o mediante raggruppamento nel caso non supervisionato. Più recentemente, attraverso metodi di deep learning (*apprendimento approfondito*), la rappresentazione del segnale che impara a misurare le forme bioacustiche ad alta risoluzione nel tempo e nella frequenza, per esempio.