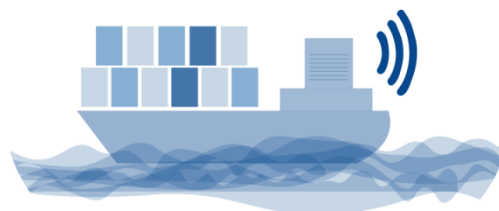
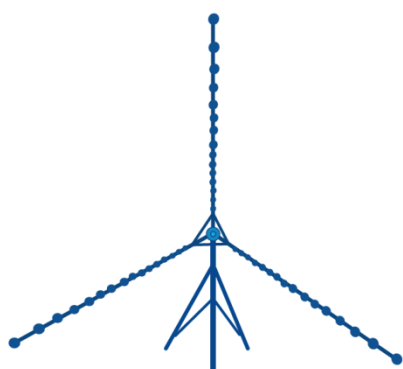


MONACUMEN



Quaderni di analisi
dell'impatto acustico dei porti
Cahiers d'analyse de bruit des ports
n.2

PROGETTO MON ACUMEN

PROJET MON ACUMEN

“MONitorage Actif Conjoint Urbain-MaritimE de la Nuisance”

Autorità del Sistema portuale del Mar Tirreno Settentrionale - sede di Livorno
Scali Rosciano 6/7, Livorno

Progetto/Projet n. 154
CUP B52H17000770003

Componente C – Comunicazione

Composante C - Communication

**Attività C.2 - Analisi delle best practices
sull'inquinamento acustico dei porti**
***Activité C.2 - Analyse des meilleures pratiques en
matière de pollution sonore dans les ports***

**Prodotto C.2.1 – Quaderni di Analisi dell'impatto
acustico dei porti**
Produit C.2.1 - Cahiers d'analyse de bruit des ports

Data di consegna prevista/*Date de livraison prévue*: 12/2020

Data di consegna effettiva/*Date de livraison réelle*: 12/2020

Organizzazione responsabile / *Organisation responsable*:

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, Università degli Studi di Genova

Livello di diffusione <i>Niveau de diffusion</i>		
PU	Pubblico/ <i>Public</i>	X
CO	Confidenziale, solo per i partner/ <i>Confidentiel, seulement pour les partenaires</i>	

Numero della documentazione da consegnare / Nombre de documents à livrer:	C.2.1
Responsabile della documentazione da consegnare / Responsable de la documentation à livrer:	ARPAT, UNIGE
Componente/Composant:	C – Comunicazione/ <i>Communication</i>

Revisione del Documento Examen de documents			
Versione Version	Data Date	Modifiche Modifications	
		Tipo di modifiche Type de changement	Modificato da Modifié de

Sintesi / Résumé
Seconda delle tre pubblicazioni previste sull'inquinamento acustico dei porti, le quali intendono dare un contributo scientifico alla discussione sulla mitigazione dell'impatto ambientale generato dai porti e sull'esempio di reti di monitoraggio specifiche per tipologia di rumore. <i>Le deuxième des trois publications prévues sur la pollution acoustique des ports vise à apporter une contribution scientifique au débat sur l'atténuation de l'impact environnemental généré par les ports et sur l'exemple des réseaux de surveillance spécifiques au type de bruit.</i>

Indice

L'ACOUSTIC CAMERA E IL MONITORAGGIO IN AMBIENTE PORTUALE	6
<i>Abstract</i>	6
1. Introduzione	6
2. L'acoustic camera: generalità.....	7
2.1. Trasduttori e array microfonici	7
2.2. La tecnica del Beamforming.....	8
3. Applicazioni dell'acoustic camera e l'ambiente portuale	11
3.1. Caso studio in ambiente portuale	12
4. Proposta per uno standard di misura in ambiente esterno.....	14
5. Conclusioni	18
Bibliografia	19
STUDIO DEI PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL RUMORE EMESSO DALLE NAVI IN MOVIMENTO IN AREE PORTUALI	20
<i>Abstract</i>	20
1. Introduzione	21
2. Materiali e metodi	24
3. Risultati	28
4. Discussioni e conclusioni.....	33
Bibliografia	35
L'ANTENNE ACOUSTIQUE ET LE MONITORAGE EN MILIEU PORTUAIRE	38
<i>Abstract</i>	38
1. Introduction.....	38
2. L'antenne acoustique : généralité	39
2.1. Transducteurs et matrices de microphones.....	39
2.2. La technique du Beamforming	40
3. Application de l'antenne acoustique et le milieu portuaire	43
3.1. Cas d'étude en milieu portuaire	44
4. Proposition pour un standard de mesure en milieu externe.....	46

5. Conclusions	50
Bibliographie	51
ÉTUDE DES PARAMÈTRES QUI INFLUENT LE BRUIT ÉMIS PAR LES NAVIRES EN MOUVEMENT DANS LES ZONES PORTUAIRES.....	52
<i>Abstract</i>	52
1. Introduction.....	53
2. Matériaux et méthodes	56
3. Résultats	60
4. Discussions e conclusions	67
Bibliographie	69

L'ACOUSTIC CAMERA E IL MONITORAGGIO IN AMBIENTE PORTUALE

Abstract

Il tema del rumore portuale sta guadagnando sempre più attenzione a causa del maggior numero di reclami da parte delle persone che vivono nelle aree urbane vicine. Inoltre, a differenza di altri tipi di rumore quale ferroviario, aeroportuale e stradale, l'attuale quadro normativo nel settore portuale è privo di una struttura adeguata e specifica. All'interno di questo contesto, l'obiettivo del documento è descrivere il funzionamento e le caratteristiche dell'acoustic camera, approfondendone l'utilizzo per le misure ambientali e il relativo monitoraggio e caratterizzazione delle sorgenti sonore nelle aree portuali.

1. Introduzione

A differenza di altri tipi di rumore quali quello ferroviario, aereo, stradale, il rumore portuale è stato a lungo trascurato senza la presenza di una normativa di riferimento specifica e consolidata. Solo di recente il fenomeno ha suscitato maggiore interesse, principalmente a causa della reazione degli abitanti delle città portuali che non tollerano più fastidi e disturbi causati dal rumore proveniente dai porti.

L'impatto acustico portuale è il risultato di una complessa sovrapposizione di rumore generato da navi, gru, carico e scarico di merci, imbarco e sbarco di persone, cantieri navali, camion e treni, che colpisce l'area sia nelle ore diurne che in quelle notturne [1].

All'interno di questo contesto, supportato da una normativa in materia di rumore portuale carente, l'utilizzo di una strumentazione innovativa quale l'acoustic camera può rientrare all'interno di una risposta più ampia per fronteggiare il rumore portuale e offrire delle soluzioni concrete all'implementazione e ottimizzazione del monitoraggio acustico in ambienti esterni, potendo inoltre portare ad una progettazione e ad azioni di risanamento acustico più mirate ed efficaci.

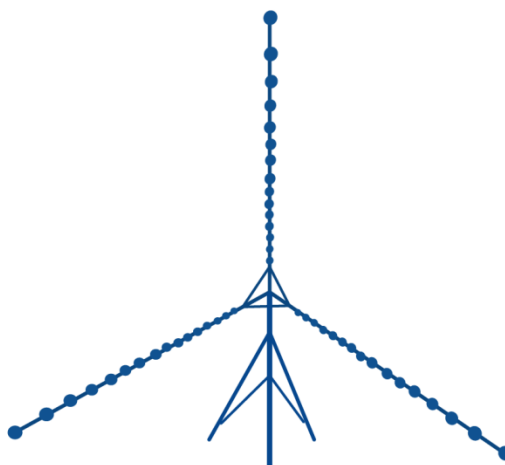


Figura 1 – Rappresentazione di acoustic camera

2. L'acoustic camera: generalità

L'acoustic camera è uno strumento progettato per localizzare le sorgenti sonore, dove all'immagine acustica, ottenuta grazie all'**array di microfoni**, viene sovrapposta un'immagine prodotta tramite una **videocamera digitale**. Inoltre, a differenza di un classico fonometro, che misura il livello sonoro dell'ambiente circostante, ma non viene identificato il posizionamento della fonte di rumore emessa, un'acoustic camera può individuare quest'ultima tramite le proprie caratteristiche e la tecnica del beamforming. Il risultato è una "foto acustica", in cui poter localizzare la sorgente del rumore e in cui i suoni vengono rappresentati in base alla frequenza per mezzo di aree più o meno grandi rispettando una scala cromatica.

Prima di addentrarci nell'applicazioni dell'acoustic camera in ambito portuale si introducono due tematiche fondamentali atte a garantire una maggiore comprensione del suo funzionamento:

- Trasduttori e array microfonici
- La tecnica del Beamforming



Figura 2 – Elementi costituenti acoustic camera¹

2.1. Trasduttori e array microfonici

I microfoni sono dei trasduttori di segnale in grado di convertire una grandezza di tipo meccanico in una grandezza di tipo elettrico, traducendo una variazione del campo di pressione (o campo acustico) in cui sono immersi, in una variazione di potenziale elettrico. Al fine di ottenere un ampio raggio di azione, di captare un maggiore numero di segnali e garantire un'elevata risoluzione, si utilizzano e dispongono, in serie o in diverse configurazioni, un certo numero di microfoni a seconda delle esigenze, che insieme formano un "array microfonico" (gruppo microfonico). Inoltre, grazie a tale strumentazione e al supporto della tecnica del beamforming è possibile effettuare rilevamenti acustici mirati, ovvero un'acquisizione simultanea di segnale.

¹ Nelle immagini modello Star48 AC Pro, gfa Tech; <https://www.acoustic-camera.com/en.html>

Si riportano di seguito le possibili configurazioni di un array microfonico [2]:

- *Array lineare*: costituito da microfoni posti a una certa distanza su una linea retta; questo tipo di array è in grado di offrire solamente una risoluzione in direzione parallela all'asse dei microfoni.
- *Array piano*: costituito da microfoni posizionati su un piano (di geometria molto variabile) e in grado di offrire risoluzione in un piano parallelo a quello dei microfoni.
- *Array sferico*: costituito da microfoni disposti in numero variabile su una superficie sferica, esso permette risoluzione in ogni direzione dell'ambiente studiato.

Ad ogni configurazione è associato un beampattern definito anche "risposta di direttività" o "modello di risposta in frequenza", che tramite rappresentazione grafica evidenzia il comportamento di un'onda sonora incidente in funzione della direzione in uno specifico piano e per una precisa frequenza. Le configurazioni di array variano rispetto ai diversi campi di applicazione possibili, ad esempio l'utilizzo di array sferici risulta idoneo per situazioni che richiedono una panoramica a 360 gradi dell'ambiente studiato quali stadi di calcio, ma anche per l'acustica di una stanza, garantendo delle misurazioni 3D.

In generale, i microfoni possono essere dislocati rispettando particolari geometrie e tra le più utilizzate troviamo: *array a griglia*, *array casuale*, *array a spirale*, *array a ruota*, *array a mezza ruota* e *array a croce*² [3].

2.2. La tecnica del Beamforming

Tra i metodi utilizzati per ottenere un'immagine acustica dalla misurazione con microfono troviamo il beamforming acustico, una tecnica di elaborazione del segnale basata su misurazioni di array di microfoni in Far-Field e sul principio di ritardo e somma (delay and sum). L'algoritmo di beamforming permette di individuare la sorgente sonora più rilevante tramite l'esecuzione di un filtraggio spaziale che permette di mappare la distribuzione delle sorgenti ad una certa distanza dall'array. Conseguentemente si va incontro a un miglioramento delle capacità di cattura del segnale in una particolare direzione.

La tecnica del beamforming con array di microfoni ben si adatta allo studio di sorgenti sonore in ambienti di particolare complessità, quali ad esempio le realtà portuali. Inoltre, risulta fondamentale per la localizzazione di sorgenti sonore su oggetti in movimento, ma può ricoprire un ruolo principale anche per sorgenti stazionarie. Infatti, tramite array il rumore di fondo può essere soppresso, consentendo di effettuare delle indagini sulle sorgenti anche in condizioni di disturbo quale riverbero o rumore proveniente dall'ambiente circostante. Il metodo del Beamforming acustico è un algoritmo di elaborazione del segnale che permette di isolare spazialmente un suono proveniente da una definita direzione, creando quindi un microfono direzionale orientabile a partire da un array microfonico di caratteristiche definite. Al fine di

² Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel.: Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; p. 19

comprendere con maggiore chiarezza la tecnica del beamforming si rimanda alle figure 3 e 4. Nella prima è osservabile uno schema semplificato di un sistema planare composto da un determinato numero di microfoni in cui un'onda (ipotizzata in questo caso piana) giunge perpendicolare allo schieramento e nell'altro caso con un angolo diverso da 90°. Nel primo caso l'onda viene vista con la stessa fase su tutti i microfoni e quindi la somma dei segnali degli stessi ripropone fedelmente l'onda incidente; nel secondo caso, invece, la differente fase con cui viene vista l'onda dai vari microfoni genera una somma 'attenuata' rispetto alla precedente, e dipendente dall'angolo incidente. Passando alla figura 4, in particolare nella rappresentazione di onda piana incidente con angolo diverso da 90°, introducendo 'ritardi' appositamente calcolati (diversi per ogni microfono e per ogni frequenza analizzata), tra il singolo trasduttore ed il 'sommatore', risulta possibile orientare 'virtualmente' l'array al fine di ottenere una somma in fase, per una direzione diversa da quella perpendicolare e ottenere l'ampiezza originale della sorgente.

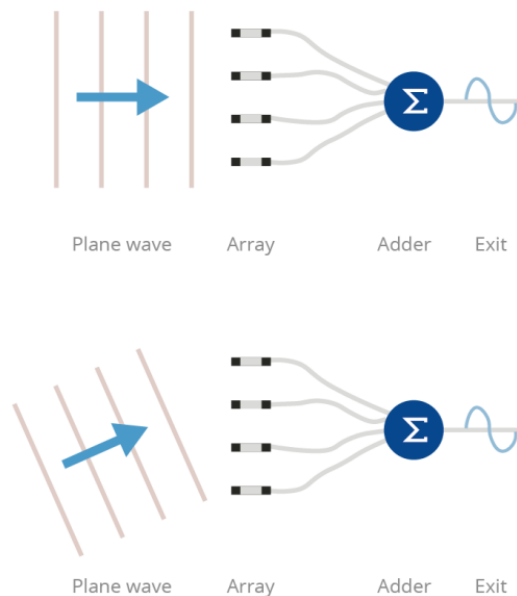


Figura 3 – Schematizzazione di array di microfoni

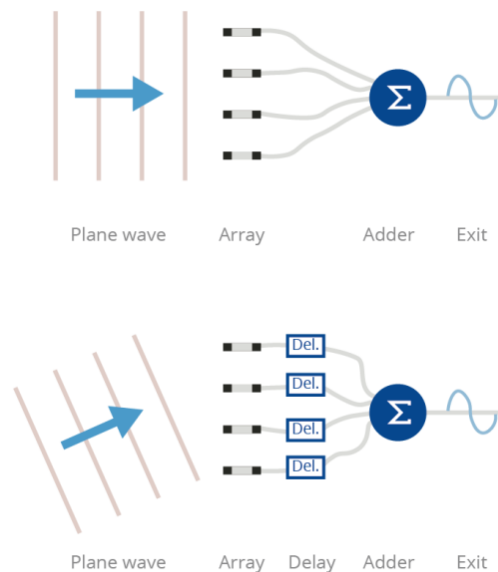


Figura 4 – Schematizzazione di array di microfoni con orientamento “virtuale” dell’array

Conseguentemente grazie alla possibilità di ‘orientare’ per mezzo di calcoli il trasduttore direzionale ottenuto, risulta possibile misurare rapidamente il rumore proveniente da diverse direzioni per calcolare la mappa acustica per mezzo di interpolazioni tra i diversi versi misurati. L’implementazione reale dell’algoritmo di calcolo risulta molto complesso a causa della necessità di ottenere ritardi diversi in funzione delle varie direzioni, delle frequenze considerate, e della posizione dei microfoni, aspetto che comunque non riguarda l’utente del sistema³ [3].

³ Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel.: Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; pp. 19-23

3. Applicazioni dell'acoustic camera e l'ambiente portuale

L'acoustic camera grazie alla sua versatilità può venire utilizzata in diversi contesti sia per ambienti interni che esterni, in particolare per quest'ultimi troviamo le sue applicazioni ad esempio per:

- Processi edilizi e inquinamento acustico dei cantieri
- Lo studio dei rumori prodotti in aeroporto con i diversi modelli di aeromobile
- Localizzare sorgenti di rumore e riduzione dello stesso negli impianti industriali
- Lo studio del rumore proveniente da turbine eoliche
- Studio e caratterizzazione del rumore portuale

Per quanto riguarda i porti marittimi, spesso il rumore proveniente da quest'ultimi è fonte di disturbo e fastidio per i residenti delle aree limitrofe. Rispetto ad altre fonti di rumore rilevanti come ferrovie, strade e aeroporti, la regolamentazione relativa al rumore portuale è incompleta e priva di leggi specifiche e al contempo l'aumento del traffico marittimo degli ultimi anni ha portato le Autorità Portuali a valutare l'impatto delle attività portuali sulla città e sull'ambiente circostante senza però poter utilizzare specifiche linee guida e direttive [4]. All'interno di questo contesto generale viene evidenziata l'assenza di standard e indirizzamenti strutturati per l'utilizzo dell'acoustic camera⁴ [3] come strumento di supporto per le misurazioni in ambito portuale e più in generale per azioni di monitoraggio e caratterizzazione di sorgenti sonore.

Inoltre, negli ultimi anni la rapida crescita delle dimensioni delle navi, in particolare da crociera, container e navi petroliera, ha comportato un cambiamento nella valutazione dell'emissione sonora all'interno dell'area portuale. In particolare, la presenza di specifici standard di misurazione dei livelli sonori di un'imbarcazione, sono focalizzati sull'utilizzo di metodi per particolari tipologie di navi e in generale di piccole dimensioni, rendendo difficile applicare tali azioni di misurazione per navi più grandi [5]. Nonostante si possa procedere a adattare le procedure di misurazione tenendo conto della forma della nave, la valutazione della distanza ottimale tra punto di misurazione e sorgente sonora è spesso difficile da identificare, riscontrando difficoltà nell'ottenere una stima accurata del punto massimo di emissione, vantaggioso per modellare una corretta propagazione del rumore ambientale. Le dimensioni di alcune tipologie di navi sono tali da non garantire una corretta misurazione della sorgente sonora. Per sopperire a tali difficoltà è possibile applicare un processo di calcolo inverso partendo da misure sperimentali effettuate rispetto a diversi standard per la valutazione del rumore ambientale. Al fine di garantire una corretta applicazione del metodo è fondamentale la conoscenza precisa del punto di emissione sonora e di direttività della sorgente. All'interno di questi contesti l'applicazione della tecnica del beamforming tramite acoustic camera può risultare un valido strumento per individuare i punti di emissione e caratterizzare al meglio la sorgente

⁴ Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel. : Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; p. 51

sonora, passando da un approccio qualitativo ad uno quantitativo al fine d'identificare la sorgente anche in termini di livello di potenza sonora. Conseguentemente l'utilizzo di tale strumentazione può fornire una risposta efficace a due delle problematiche di maggiore rilevanza all'interno di un ambiente portuale, ovvero quella della difficoltà di riuscire a identificare il contributo specifico di ogni sorgente sonora a causa della moltitudine di sorgenti concorrenti, e di riuscire a individuare con precisione sorgenti poste a distanze considerevoli.

3.1. Caso studio in ambiente portuale

Al fine di valutare l'efficacia dell'acoustic camera sono state effettuate delle misurazioni nell'arco di una giornata in tre località diverse all'interno del porto di Genova, utilizzando gli array microfonici Star48 AC (frequenza di campionamento 48,0 kHz), mentre per acquisire, memorizzare ed elaborare le informazioni raccolte si è utilizzato un personal computer predisposto con il software NoiselImage 4.2.12 per l'analisi acustica.

In generale la procedura seguita può essere suddivisa in tre fasi:

- a) Predisposizione dell'attrezzatura tramite montaggio e calibrazione della stessa
- b) Misurazione con registrazione dell'attività portuale d'interesse
- c) Analisi dei dati, estrapolando, tramite utilizzo del software:
 - video acustici
 - fotografie acustiche
 - spettri e spettrogrammi

Per quanto riguarda c) si è valutata la localizzazione della sorgente, le frequenze in gioco rispetto ai livelli di pressione sonora e analizzate le variazioni di frequenza in funzione del tempo.

Dai risultati sperimentali ottenuti, viene confermata la complessità dell'ambiente portuale dove è possibile identificare diverse sorgenti sonore che possono essere classificate per durata, intensità, posizione e contenuto spettrale. L'utilizzo dell'acoustic camera ha evidenziato come suo punto di forza l'identificazione di sorgenti sia in movimento che stazionarie, individuandone posizione e livello di pressione e potenza sonora. Al contempo vi è la necessità di determinare con appositi strumenti la distanza della sorgente, aspetto che si complica in presenza di molti oggetti. In generale l'acoustic camera si è rilevata essere una strumentazione applicabile e utile per il monitoraggio e la caratterizzazione di sorgenti sonore all'interno dell'ambiente portuale, svolgendo studi sia di carattere qualitativo che quantitativo.

L'analisi eseguita consente di supportare la stesura di prime linee guida per l'applicazione dell'acoustic camera all'interno dell'ambiente portuale. Si rimanda al paragrafo successivo per il relativo approfondimento.

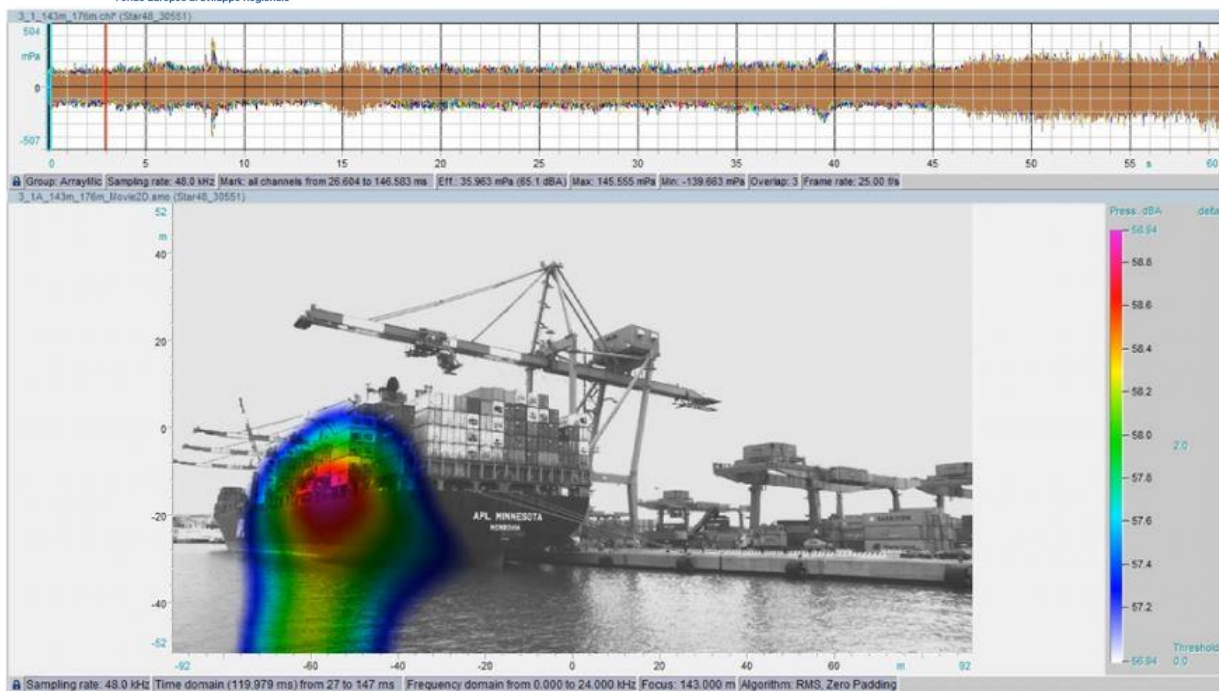


Figura 5 – Foto acustica ottenuta tramite utilizzo acoustic camera

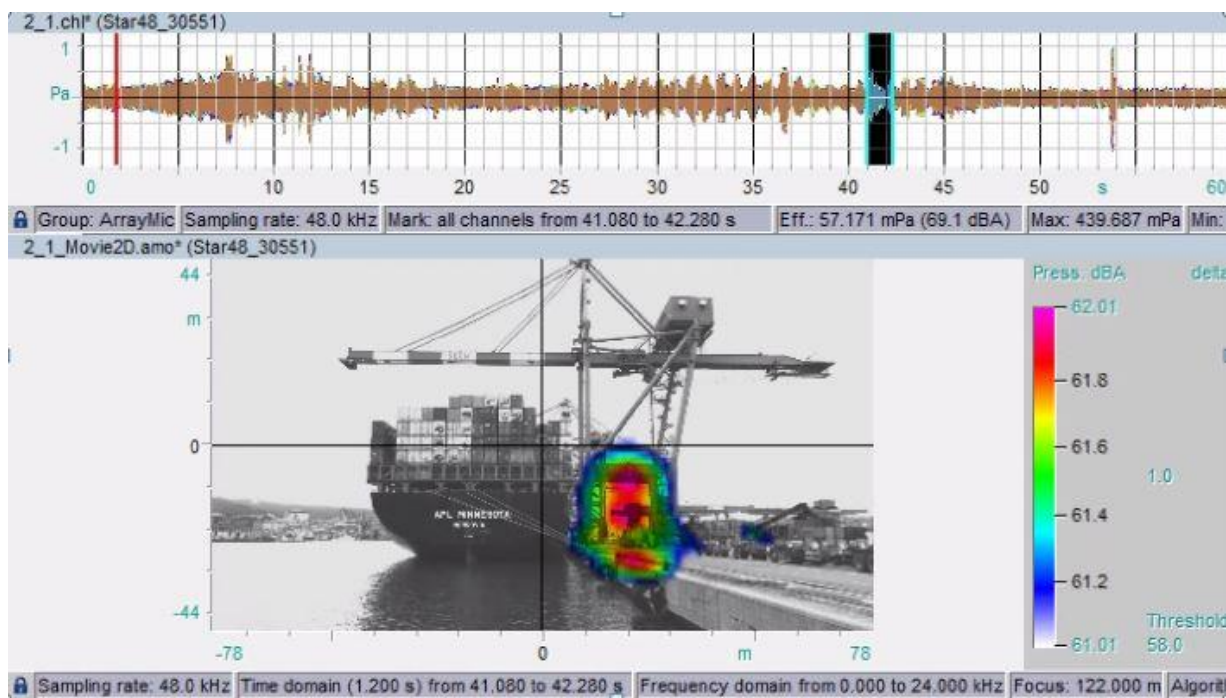


Figura 6 – Foto acustica ottenuta tramite utilizzo acoustic camera

4. Proposta per uno standard di misura in ambiente esterno

Vengono riportate di seguito delle linee guida per effettuare misurazioni con acoustic camera in ambito portuale e più in generale in ambiente esterno⁵ [3]:



⁵Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel. : Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; pp. 60-62

1. Pianificazione delle misure

Analisi preliminare in sito per pianificare in modo qualitativo:

- analisi delle condizioni metereologiche
- analisi dello stato dei luoghi e della conformazione dell'ambiente dove sono previste le misurazioni, individuando le possibili fonti di rumore predominanti
- analisi del posizionamento dell'attrezzatura al fine di garantire anche la sicurezza per l'operatore e il rispetto della distanza minima/massima per il corretto funzionamento dell'array

Scelta dell'array di microfoni per la misurazione e di **eventuali attrezzature** in funzione dei punti elencati precedentemente. In particolare:

- definizione parametri tecnici dell'array, algoritmo beamforming, calibrazione dati rispetto allo scenario oggetto di studio
- forma dell'array -> configurazione della matrice
- per misurazioni prolungate munirsi di dispositivi di memoria elevata per registrare i dati
- pianificazione dei tempi di misura

2. Esecuzione delle misure

- Predisposizione all'uso dell'acoustic camera
- Misurare la distanza sorgente\ricevitore con strumenti appropriati per un corretto calcolo della potenza sonora
- Calibrazione dello strumento tramite una sorgente portatile posizionata a distanza conosciuta o affidandosi ad altri standard per la calibrazione dei trasduttori oppure tramite il modulo che offre il produttore

Creazione di registrazioni sonore:

- Effettuare le misure in diverse modalità (spazio, tempo) a seconda dello scenario
- Effettuare misure (se necessario) sia giornaliere che notturne

3. Analisi dei dati

Lavorazione ed elaborazione

Analisi delle registrazioni tramite software dedicato per l'estrazione dei dati.

- Identificazione delle sorgenti principali e di quelle secondarie
- Ascolto diretto del segnale
- Foto acustica 2D, 3D e riproduzione
- Foto spettrale e riproduzione,
- Filmato acustico e riproduzione
- Spettri FFT e / o 1/3 d'ottava
- Spettrogrammi con filtraggio e riproduzione del segnale filtrato
- Stima degli errori sull'accuratezza delle misure tramite il confronto dati con altri strumenti
- Stima della potenza sonora dopo la correzione degli errori

Caratterizzazione della sorgente

In funzione dello studio affrontato, caratterizzare le sorgenti misurate basandosi sui dati estratti. In particolare tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- Tipologia sorgente
- Sorgente stazionaria o in movimento
- Localizzazione, foto acustica
- Durata dell'evento
- Ora d'inizio e di fine
- Evento periodico, singolo, continuo
- Caratteristiche della frequenza
- Definizione della distanza
- Lw, dB – dB(A)

Per approfondire alcune analisi focalizzate su singole parti, si può utilizzare una strumentazione più adatta al near-field.

4. Proposta progettuale

Successivamente all'analisi dei dati, se necessario, si può passare alla fase di proposta progettuale al fine di garantire un miglioramento in termini acustici dello scenario studiato, nel rispetto degli standards, delle linee guida e della normativa di riferimento, andando così a determinare una possibile soluzione del problema in termini di costo, fattibilità, tempo.

Attrezzatura consigliata

- Mappe satellitari, rilievi, mappe informative per il calcolo delle distanze
- Laptop dotato di hardware prestazionale in caso di analisi diretta in sito
- Dispositivo per la calibrazione dei microfoni
- Dispositivo di memorizzazione (preferibile una SSD)
- Registratore di dati per il campionamento dei segnali
- Dispositivo di misurazione distanza in caso di sorgenti non stazionarie
- Generatore per eventuali misurazioni in condizione di assenza di alimentazione
- Cablaggi adatti alla situazione in termini di lunghezza e prestazioni
- Protezioni in caso di maltempo o accessori utili in condizioni ventose

5. Conclusioni

L'acoustic camera può essere utilizzata efficacemente per misure di rumore nell'ambiente esterno, soprattutto in presenza di diverse sorgenti concorrenti. Inoltre, la possibilità di svolgere misure acustiche su sorgenti remote sta ampliando il mercato dell'acoustic camera, rendendolo uno tipo di strumentazione versatile e adattabile a diverse realtà e ambienti. Al contempo l'assenza di standard e linee guida specifiche porta a non sfruttare al massimo le potenzialità di tale tecnologia, a causa anche dalla mancanza di metodiche specifiche durante la fase di rilievo acustico.

La presentazione di linee guida generali può risultare un punto di partenza per contribuire alla nascita di standard specifici e all'espansione nell'utilizzo dell'acoustic camera, potendo inoltre garantire approcci di tipo quantitativo allo studio delle sorgenti.

Bibliografia

1. Diego Palazzuoli; Gaetano Licitra; «Report sulle carenze dello stato dell'arte» (Prod. T1.2.1), 2018; Progetto Report, PC Interreg IT-FR Marittimo 14-20
2. Lorenzo Ferri; «Il metodo del beam-forming acustico», tesi di laurea; UNIBO; 2015; pp. 21-22; rel.: Prof. Fabio Ortolani; https://amslaurea.unibo.it/8735/1/ferri_lorenzo_tesi.pdf
3. Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel.: Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli;
4. Matteo Bolognese et al., «Port Noise and Complaints in the North Tyrrhenian Sea and Framework for Remediation», *Environments* 7, n. 2 (24 febbraio 2020): 17, <https://doi.org/10.3390/environments7020017>
5. Antonino Di Bella, Francesca Remig, «Measurement methods for the assessment of noise impact of large vessels»

STUDIO DEI PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL RUMORE EMESSO DALLE NAVI IN MOVIMENTO IN AREE PORTUALI

MARCO NASTASI (1), LUCA FREDIANELLI (1), MARCO BERNARDINI (2), LUCA TETI (3), FRANCESCO FIDECARO (1), GAETANO LICITRA (4).

- 1) Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi", Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, m.nastasi@studenti.unipi.it (M.N.); fredianelli@df.unipi.it (L.F.); francesco.fidecaro@unipi.it (F.F.)
- 2) CNR-INM Section of Acoustics and Sensors O.M. Corbino, via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Rome, Italy; marcobernardini.s@gmail.com
- 3) iPOOL S.r.l., via Cocchi 7, 56121 Pisa, Italy; luca.teti@i-pool.it
- 4) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, 56127 Pisa, g.licitra@arpat.toscana.it

Abstract

Dopo diversi anni di inconsapevolezza, solo di recente il rumore è stato preso in considerazione negli studi di sostenibilità ambientale delle infrastrutture portuali. I Progetti del Programma MARITTIMO INTERREG hanno sollevato dei problemi fin qui trascurati, quali la mancanza di una normativa opportuna e la valutazione dell'esposizione al rumore dei cittadini. Nonostante la grande presenza e varietà di sorgenti di rumore nei porti, molte di queste non sono ancora propriamente caratterizzate da un punto di vista acustico. I Progetti INTERREG hanno dato impulso alla ricerca in questo campo ed esistono alcuni studi che si sono occupati del rumore prodotto dalle navi in movimento all'interno dei porti. Questo lavoro parte da una precedente campagna di misure mirata ad ottenere dei livelli di potenza sonora, a banda larga e spettrali, di sorgenti navali in movimento e punta ad approfondire la variabilità riscontrata. Più di un mese di misure di rumore in continua e di registrazioni video sono stati analizzati al fine di preparare un database di partenza quanto più preciso possibile. Al fine di approfondire l'influenza di alcuni parametri quali la minima distanza di passaggio dal punto di misura, la velocità di transito e il pescaggio della nave sull'emissione di rumore è stata effettuata una regressione multilineare su di essi. Per valutare la minima distanza di passaggio è stata introdotta una innovativa metodologia che sfrutta le registrazioni video e fornisce dei risultati con una incertezza di 3 m. Conoscere quale parametro è più influente può aiutare a pianificare opportune campagne di monitoraggio o a proporre delle linee guida. Il pescaggio delle navi risulta essere meno influente rispetto agli altri parametri nell'emissione di rumore dei traghetti analizzati, la distanza e la velocità sono stati utilizzati per migliorare la valutazione della potenza sonora delle sorgenti di interesse. Tramite l'analisi spettrale e la correlazione con i parametri oggetto di studio è stato possibile individuare il range di frequenze, tra 500 Hz e 2.5 kHz, più influenti nell'emissione sonora delle navi in transito. Riferendo i passaggi alla stessa distanza e velocità di riferimento è stato possibile ottenere dei risultati più precisi di 0.5 dB(A). Il corretto posizionamento della sorgente risulta particolarmente importante nel calcolo della propagazione del rumore effettuato tramite modelli di simulazione acustica con l'obiettivo di valutare il rumore nelle aree portuali e in quelle circostanti.

1. Introduzione

Fin dai tempi più antichi, il trasporto marittimo è tra i più importanti mezzi di trasporto di persone e merci. Con lo sviluppo del traffico aereo, i trasporti sulle grandi distanze hanno beneficiato di un grande vantaggio in termini di velocità, tuttavia, il traffico marittimo mantiene comunque un ruolo di primaria importanza nel commercio ancora oggi. Sicuramente gran parte di questa importanza è dovuta alla grande quantità di merci che il trasporto marittimo riesce a muovere, rendendolo un mezzo più lento ma sicuramente più economico, inoltre il trasporto di combustibili fossili non sarebbe altrimenti possibile. Non è un caso se quasi ogni Paese ne fa uso nel commercio con il resto del mondo [1].

Secondo quanto riportato nella review sul trasporto marittimo delle Nazioni Unite [2], il 2018 ha registrato quasi 12 miliardi di tonnellate di carico suddiviso tra portacontainer, navi portarinfuse, motocisterne e navi da carico all'interno del commercio marittimo internazionale. Questi numeri rappresentano un incremento del 2.7% del traffico, in lieve flessione rispetto al 4.1% del 2017. Insieme alle tensioni geopolitiche tra gli USA e la Cina, le preoccupazioni di carattere ambientale sono state riconosciute come un fattore responsabile di questa riduzione nel tasso di crescita.

Considerando che anche il trasporto passeggeri tramite traghetti e navi da crociera è parte integrante del traffico marittimo, le implicazioni riguardano l'ampliamento delle aree portuali, l'aumento dei movimenti navali e il coinvolgimento delle aree abitate prossime agli insediamenti portuali operativi ed industriali. Proteste cittadine sono state già documentate nelle aree portuali di Dublino [3] e Atene [4], così come in quelli di La Spezia e Nizza [5].

Le proteste sono anche causate dal fatto che l'inquinamento acustico è uno dei maggiori impatti ambientali, che conduce ad una varietà di effetti sulla salute ampiamente documentati [6]: disturbi del sonno [7], annoyance [8, 9], difficoltà di apprendimento [10, 11], ipertensione [12], malattie cardiovascolari e respiratorie [13, 14] sono tra le conseguenze più frequenti ed importanti.

Ben consapevole dei rischi indotti dal rumore sulla salute, già nel 2002, l'Unione Europea ha approvato la Direttiva Europea 2002/49/EC (END) [15], che richiede agli Stati Membri di produrre mappe di rumore strategiche e piani di azioni per le principali infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali e per i centri urbani ogni cinque anni. La END è stata quindi un incoraggiamento alla comunità scientifica per lo studio delle emissioni di rumore, delle mappe di impatto acustico sul territorio e della mitigazione dell'impatto stesso [16-20].

Il rumore di origine portuale è stato trascurato dalla END con una conseguente marginalizzazione dei lavori e degli studi al riguardo. In effetti non sono molti i progetti o gli studi [21-27] che sono stati portati avanti sulla caratterizzazione delle sorgenti portuali, sulle mappature acustiche o sui piani di azione e, ultimo ma non meno importante, la valutazione dell'esposizione della popolazione al rumore portuale. In aggiunta alla carenza di studi esistenti, la complessità degli

ambiti portuali rende spesso difficile effettuare delle campagne di misura. Le dimensioni delle aree interessate, il grande numero di sorgenti presenti, spesso sovrapposte, e le difficoltà di accesso alle varie zone per motivi legati alla sicurezza sono solo alcuni dei problemi per studi di questo tipo. Inoltre, la varietà di sorgenti è grande e ognuna richiede una caratterizzazione acustica specifica per poter ottenere dei dati di input adeguati e necessari alla fase di mappatura.

Allo stato attuale, si può dire che lo studio del rumore di origine navale è in uno stato embrionale, ed è importante seguire quanto mostrato dagli studi recenti. L'emissione sonora di una nave varia a seconda che quest'ultima sia in moto o meno. Nonostante il fatto che le misure di una nave in stazionamento potrebbe sembrare facile, le dimensioni dell'oggetto, la numerosità di sorgenti con la loro varietà nei meccanismi di generazione del rumore hanno spinto alcuni autori [28-33] e il Progetto NEPTUNES [34] a proporre alcuni metodi di misura per il rumore prodotto da navi ferme a banchina. Nuovo impulso a questa ricerca è stato dato dal Programma INTERREG Marittimo Italia-Francia 2014-2020, che include diversi Progetti che hanno lo scopo di colmare le lacune nella conoscenza riguardo al rumore portuale individuando, al contempo, le migliori pratiche in termini di sostenibilità ambientale a lungo termine nell'area del Mar Tirreno Settentrionale [35, 36]. Le navi in movimento sono state studiate in maniera minore, probabilmente a causa del fatto che ci si aspetta che le loro rotte siano lontane dalle aree abitate. Tuttavia, particolarmente nelle città con canali navigabili [37, 38], o anche in situazioni più comuni delle aree portuali, il rumore prodotto dalle navi può raggiungere le abitazioni. Mentre le moderne navi da crociera hanno dei macchinari più moderni e silenziosi [39], altre tipologie di navi sono state segnalate come significative sorgenti di emissione di rumore da Fredianelli et al. [40].

Nel precedente lavoro di Fredianelli et al. [40], sono stati ricostruiti i livelli di potenza sonora, a banda larga e spettrale, grazie all'analisi di misure pass-by a lungo termine per navi di tipo rollo-on/roll-off (RORO), portacontainer, motocisterne, chimichiere e traghetti. In aggiunta alle sopracitate difficoltà nelle misure in ambito portuale, bisogna tenere in considerazione un certo grado di variabilità delle sorgenti, considerato che anche la medesima sorgente può produrre diversi livelli di rumore in funzione di differenti condizioni. Per queste ragioni, i risultati presentati in [40] presentano grandi incertezze.

Il presente lavoro mira a spiegare le incertezze associate ai livelli di potenza sonora di grandi navi in movimento e come l'emissione possa variare in funzione della distanza tra sorgente e ricevitore, così come della velocità e del pescaggio della nave stessa. Le misure di rumore e le registrazioni video sono state analizzate al fine di escludere i transiti disturbati da altre sorgenti sonore contemporanee. I dati di pescaggio sono stati forniti dal sistema di informazione telematico del Porto di Livorno e la velocità è stata facilmente ricavata dalle immagini video, mentre per quanto riguarda la stima della minima distanza della nave dal microfono è stata introdotta una metodologia in grado di sfruttare le registrazioni video.

L'analisi è stata condotta separatamente sui transiti ripetuti di tre traghetti specifici per ridurre la variabilità legata alle caratteristiche proprie delle navi. Alla fine, è stato fatto un confronto dei risultati per valutare l'emissione di rumore di diverse navi appartenenti alla stessa categoria.

Per valutare l'effetto della distanza sorgente-microfono, della velocità e del pescaggio è stata eseguita una regressione multilineare.

Al fine di ricostruire la potenza sonora a partire dai livelli di rumore ottenuti dalle misure analizzate è stato utilizzato il software di simulazione acustica SoundPLAN v.8.1. All'interno della modellizzazione la sorgente navale in movimento è stata rappresentata da una linea di emissione sonora in analogia con le sorgenti modellizzate di tipo stradale o ferroviario. I risultati permettono di migliorare la qualità degli input da usare nei modelli acustici per le mappature e la valutazione dell'esposizione al rumore dei cittadini. Inoltre, conoscere i parametri più influenti sul rumore navale può risultare utile alle autorità preposte a regolare le attività portuali per eventuali azioni di mitigazione acustica o il futuro sviluppo di aree portuali più silenziose in prossimità di abitazioni.

2. Materiali e metodi

Le misure sono state effettuate all'ingresso del porto industriale di Livorno tra il 24 maggio e il 5 settembre 2018, è stato utilizzato un fonometro di classe I, in accordo con le raccomandazioni della norma IEC 61672-1 [41], ed è stata posizionata una centralina meteo (Figura 1). La strumentazione è stata posizionata sulla banchina, ad 1 m dall'acqua, con il microfono da campo libero all'altezza di 4 m, è stata utilizzata una cuffia antivento da 90 mm. I periodi di misura con vento superiore a 5 m/s e quelli di pioggia sono stati esclusi dall'analisi come da consuete buone pratiche di misura, lo stesso è stato fatto per eventi occorsi con valori della scala di Beaufort superiori a 3 [42]. I transiti delle navi sono stati evidenziati selezionando l'evento sonoro a -10 dB(A) dal livello di picco. Per ogni transito sono stati calcolati: il L_{Aeq} , il SEL (*sound exposure level*) e i livelli dello spettro.



Figura 1 – Mappa dell'area e localizzazione della posizione di misura.

I criteri per ottenere SEL e L_{Aeq} sono stati derivati, per analogia, dalla norma ISO/CD 11819-1 [43], che descrive un metodo per la valutazione del rumore da traffico stradale usando misure a bordo strada ed è noto come metodo SPB (*Statistical Pass-By*). L'SPB si basa sull'analisi di un gran numero di veicoli, considerando passaggi acusticamente isolati, che rappresentano il parco auto realmente circolante, con una misura contemporanea della velocità di percorrenza della strada.

Nell'adattamento del metodo agli scopi dello studio gli indicatori utilizzati sono leggermente diversi da quelli prescritti dalla norma sopracitata, è stato seguito un approccio simile allo standard SPB modificato [44].

Il posizionamento della misura è stato scelto in maniera da garantire la prossimità al canale di accesso della zona nord del porto e la sicurezza della strumentazione, sottoposta a videosorveglianza e in una zona con sistema di allarme. La strumentazione ha registrato i transiti di rimorchiatori, pilotine, traghetti, portacontainer, RORO, chimichiere e motocisterne.

Il rumore di fondo dell'area è principalmente dovuto al mare al vento, oltre che alla strada più prossima che, essendo interna al porto, è trafficata solo da pochi mezzi pesanti a bassa velocità i cui transiti contemporanei ai passaggi navali di interesse hanno portato all'esclusione dall'analisi di questi ultimi, riducendo le contaminazioni del set di dati.

Grazie al sistema di videosorveglianza dell'Autorità Portuale di Livorno è stato possibile agevolare il riconoscimento delle navi e calcolare la velocità dei passaggi. Incrociando i dati di traffico provenienti dal sistema di informazione telematico del Porto di Livorno è stato possibile individuare le finestre temporali, di circa 40 minuti, dei passaggi di interesse.

A causa del fatto che i traghetti hanno orari programmati precisi per arrivi e partenze l'analisi ha interessato solo questa categoria di navi, altra ragione per la scelta è che i traghetti hanno maggiore omogeneità acustica e rappresentano il 10% dei passaggi totali dal canale posto a monitoraggio. Inoltre, il numero di navi differenti era ridotto a tre unità, permettendo quindi l'analisi di più passaggi della stessa nave, questo è stato utile anche per limitare la variabilità delle sorgenti sonore dipendenti appunto dalle caratteristiche intrinseche della nave che influenzano l'emissione sonora complessiva.

L'acquisizione dati e l'analisi preliminare dei dati di rumore, delle registrazioni video e dei dati di traffico ha portato alla creazione di un database contenente, per ogni passaggio:

- nome della nave;
- dimensioni fisiche della nave;
- minima distanza dal microfono;
- velocità di transito;
- pescaggio;
- L_{Aeq} ;
- SEL;
- spettro in terzi d'ottava;
- data e momento del passaggio;
- tipo di movimento (partenza o arrivo).

La velocità di transito è stata calcolata a partire dalle immagini video, è interessante notare che, nonostante esistano dei limiti imposti per la velocità di transito in porto pari a 5 nodi, le velocità rilevate spaziano in un intervallo tra i 4.8 e i 9.3 nodi ($2.5 \div 4.8$ m/s).

La stima della distanza è risultata invece una sfida interessante da affrontare. Anche se in linea di principio è possibile effettuare la misura per mezzo di un metro laser, nel caso in esame non è stato possibile sia per motivi tecnici che per la necessità di un operatore, impossibile per misure a

lungo termine come quelle condotte. Un'alternativa è quella di reperire i dati AIS (*automatic identification system*) ma è necessario acquistare tali dati e il budget era stato investito sull'acquisto dei dati di traffico navale. Di conseguenza è stato sviluppato un metodo che sfrutta le immagini di videosorveglianza e che ha fornito una stima affidabile con una incertezza di 3 m, su distanze dell'ordine dei 50 m.

Il metodo sviluppato si basa sui seguenti passaggi, eseguiti per ogni singolo transito esaminato:

1. sono stati individuati dei riferimenti al suolo all'interno della vista delle immagini di videosorveglianza;
2. i riferimenti sono stati riportati su un sistema GIS (*Geographic Information System*), in maniera da identificare le coordinate geografiche;
3. sono state tracciate delle linee tra i punti di riferimento e la posizione della telecamera presa in considerazione;
4. i punti di riferimento individuati sono stati sovrainpressi ai video;
5. è stata catturata il fermo immagine del transito in esame quando la nave si trovava in corrispondenza di due riferimenti;
6. conoscendo la lunghezza totale della nave è stato possibile, tramite delle semplici considerazioni geometriche, riportare un segmento di lunghezza nota sul sistema GIS;
7. si è resa così possibile la stima della distanza tra la linea di percorrenza della nave e la posizione del microfono, sotto l'assunzione che la linea fosse parallela al canale.

In Figura 2 è riportato uno schema del metodo utilizzato.

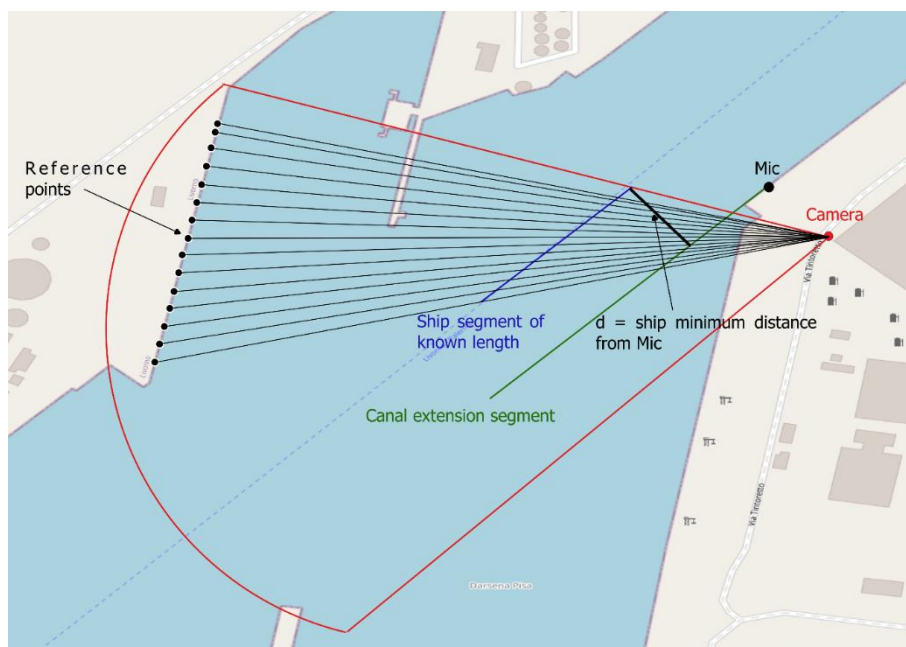


Figura 2 - Esempio del sistema GIS per il calcolo della distanza minima dal microfono tramite l'uso delle immagini video.

Al fine di studiare l'effetto dei tre parametri considerati (distanza, velocità e pescaggio) sull'emissione sonora è stata effettuata una regressione multilineare. L'analisi è stata effettuata su ogni singola nave, onde ridurre la variabilità dovuta a caratteristiche dipendenti dalla nave stessa.

La dipendenza dalla distanza, ben nota in linea di principio, è stata utilizzata per applicare una correzione ai livelli misurati e per riportarli ad un valore medio di distanza equivalente per tutti i passaggi. In questo modo è stato possibile apprezzare meglio gli effetti dovuti al pescaggio e alla velocità di transito.

Parallelamente è stata portata avanti un'analisi sui livelli spettrali al fine di individuare l'intervallo di frequenze attribuibili alle sorgenti della nave.

In analogia con i modelli di traffico stradale e ferroviario, si è scelto di modellizzare la sorgente navale in movimento come una linea di emissione sonora. L'uso di un modello di simulazione è stato necessario al fine di calcolare i livelli potenza sonora⁶ a partire da misure di rumore (livelli di pressione sonora), opportunamente corrette grazie allo studio dei parametri sopracitati. Inoltre, in questa maniera è stato fornito un livello di pressione sonora utilizzabile in un modello di simulazione per la propagazione e il calcolo di eventuali mappe di rumore e valutazione dell'esposizione al rumore.

⁶ Più propriamente si tratta di un livello di densità lineare di potenza sonora indicato dal simbolo $L_{W/m}$ ed espresso in dB(A) o dB.

3. Risultati

Al fine di quantificare i miglioramenti nella riduzione delle incertezze sui livelli di potenza sonora rispetto al lavoro precedente [40] si è iniziata l'analisi considerando tutti i traghetti e calcolando il livello di potenza sonora ($L_{W/m}$). I livelli a banda larga (ponderati e lineari) e lo spettro sono mostrati in Figura 3.

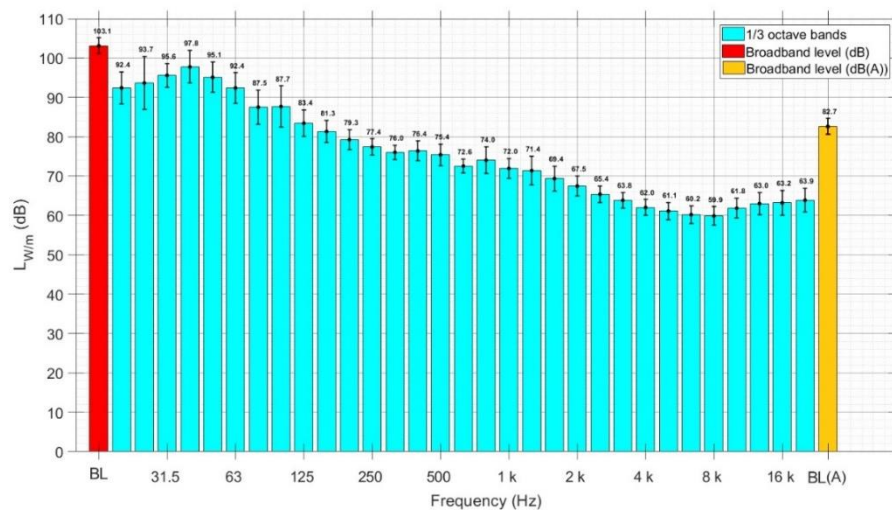


Figura 3 - Livelli di $L_{W/m}$ e relativa incertezza, banda larga e spettro.

L'analisi di regressione multivariata mostrata in Figura 4 ha permesso di comprendere meglio le dipendenze dei livelli di rumore dai parametri presi in considerazione, evidenziando una non significatività statistica del pescaggio che, nel seguito, è stato escluso dall'analisi.

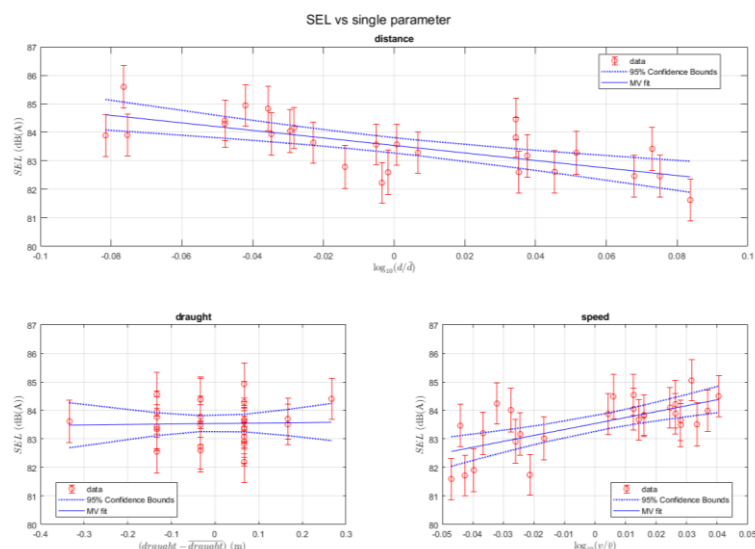


Figura 4 - Regressione multipla sul SEL dei passaggi, in funzione di: minima distanza, velocità di transito e pescaggio.

Successivamente è stato possibile correggere i livelli di pressione misurati riferendoli a condizioni omogenee di distanza. Grazie appunto all'analisi multivariata e ai coefficienti ricavati tutti i passaggi sono stati ricalcolati riconducendoli alla distanza di riferimento, pari a quella media di 47.1 m. In questo modo l'unica dipendenza è rimasta quella della velocità di transito, il cui riferimento pari al valor medio è di 3.9 m/s (7.5 nodi).

La stessa procedura è stata applicata anche a tutte le bande in terzi d'ottava dello spettro, cercando una correlazione tra i livelli di rumore e la velocità. Le frequenze con correlazione inferiore a quella del valore a banda larga sono state quindi escluse, ottenendo l'intervallo desiderato di interesse che è risultato andare da 500 Hz a 2.5 kHz, queste bande sono quelle presumibilmente più utili a caratterizzare la rumorosità prodotta dal transito dei traghetti. In Figura 5 sono mostrati gli andamenti in funzione della velocità del livello di rumore delle bande selezionate.

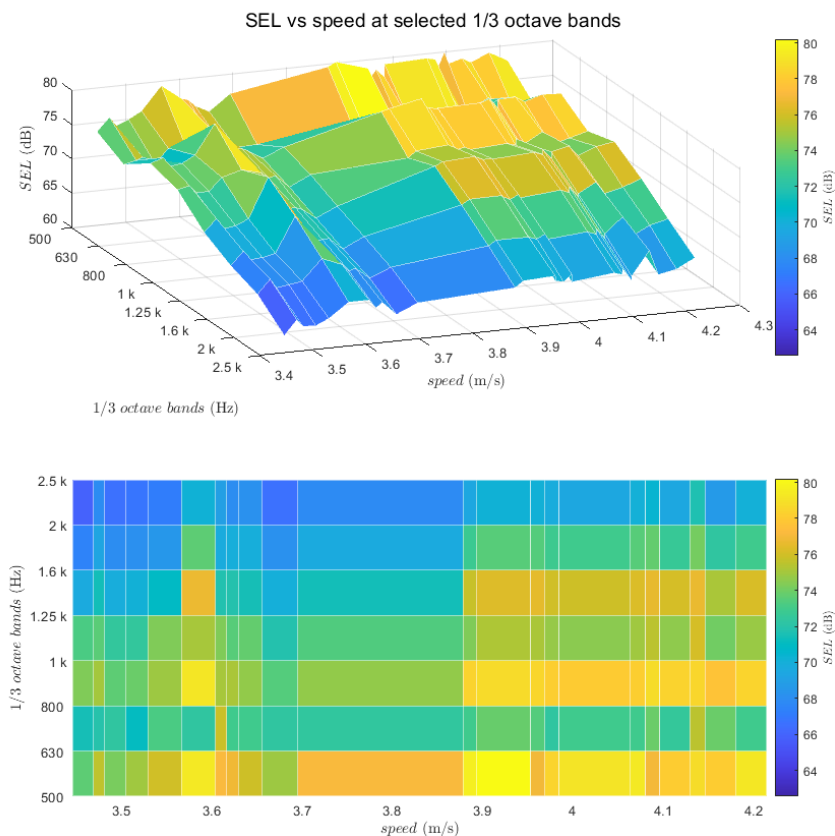


Figura 5 - Variazione dei SEL dello spettro in funzione della velocità.

Si può notare come all'aumentare della velocità (verso destra) i livelli di rumore siano sempre più elevati (colori più caldi).

Dopo la correzione dei livelli di rumore sono stati ricalcolati i livelli di potenza sonora, i risultati sono mostrati in Figura 6.

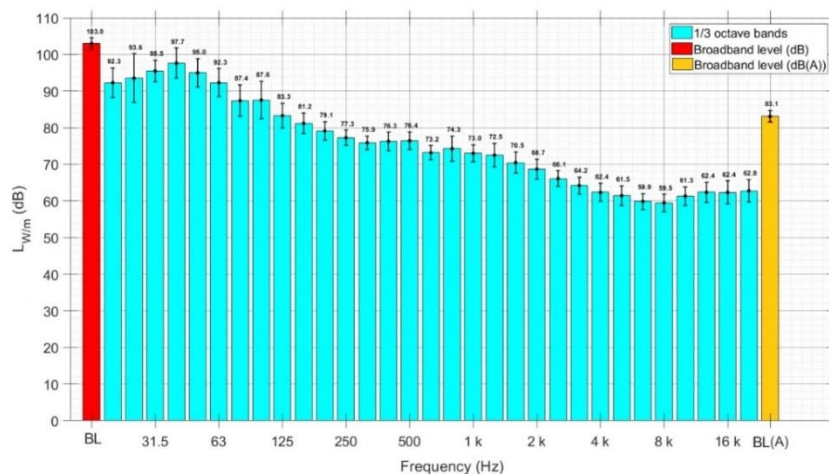


Figura 6 - Livelli aggiornati di $L_{w/m}$ e relativa incertezza, banda larga e spettro.

Come ultima cosa è stata effettuata un'analisi relativa all'effetto della variabilità delle navi, quindi delle caratteristiche intrinseche che ne influenzano l'emissione sonora. In Figura 7 sono mostrate le distribuzioni di SEL di ogni nave.

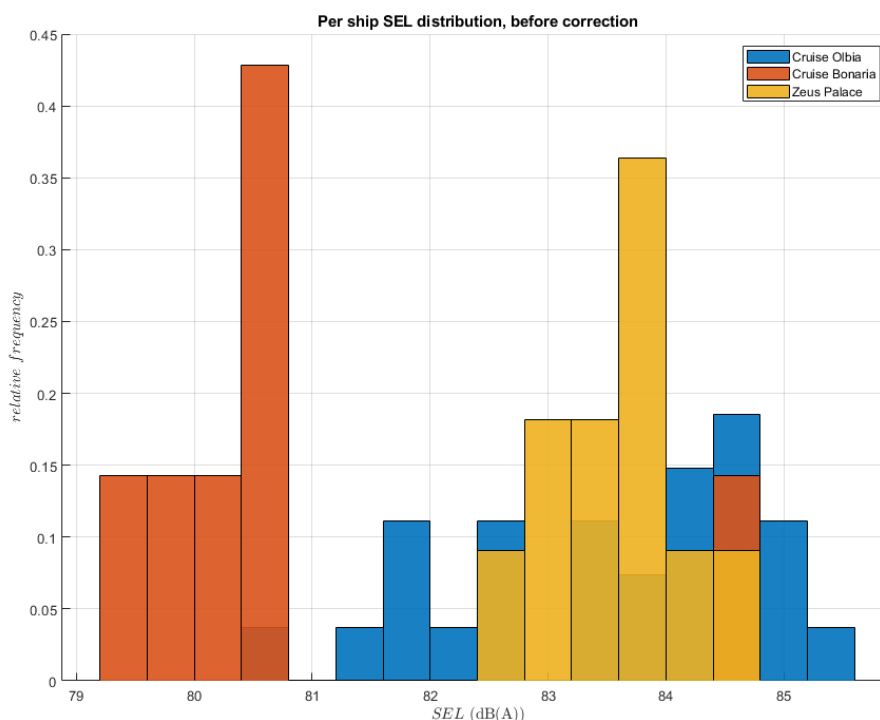


Figura 7 - Distribuzioni dei SEL delle navi, valori pre-correzione.

Il valor inferiori relativi ai passaggi della nave Cruise Bonaria sono però dovuti ad una maggiore distanza dei passaggi rispetto agli altri due traghetti, come si può facilmente osservare dalle distribuzioni delle distanze mostrate in Figura 8.

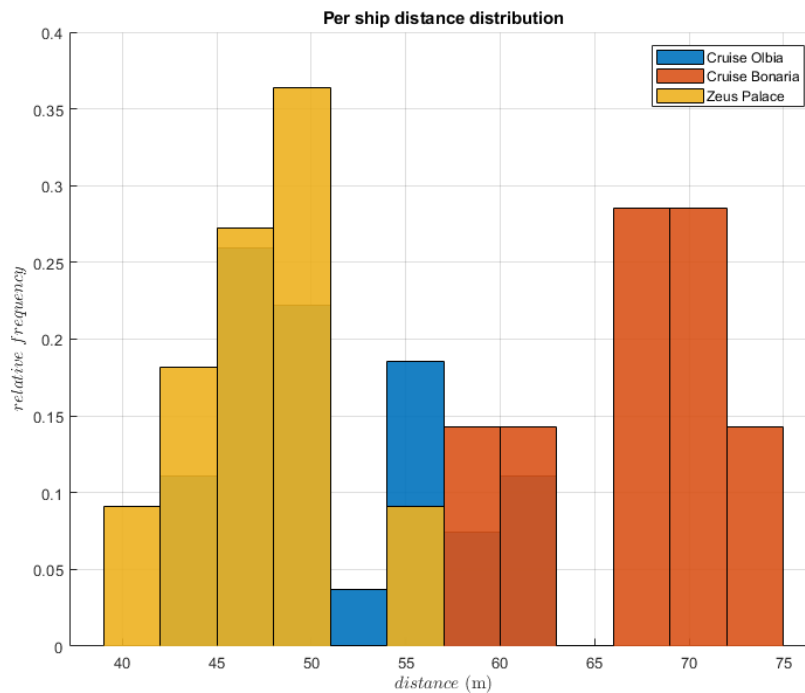


Figura 8 - Distribuzioni delle distanze minime dal microfono delle navi.

Dalla Figura 9 si osserva chiaramente l'effetto della correzione in funzione della distanza applicata sui SEL dei passaggi delle tre navi.

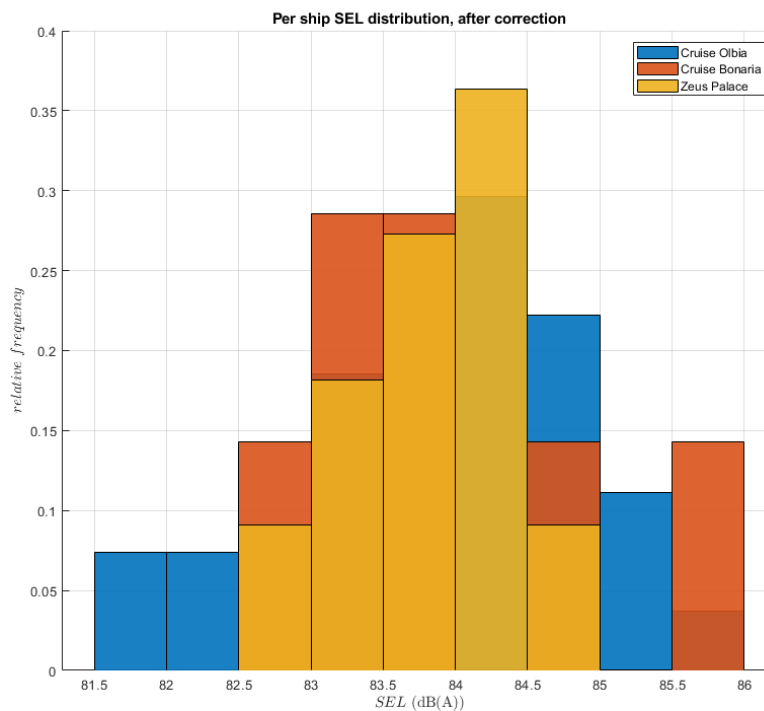


Figura 9 - Distribuzioni dei SEL delle navi, valori post-correzione.

Nella Tabella 1 si possono vedere quantitativamente i miglioramenti ottenuti. La deviazione standard (std) dopo la correzione è ridotta grazie a due fattori: la riduzione della variabilità delle singole navi e dai valori medi più vicini tra loro, effetto della correzione per distanza.

Miglioramenti analoghi sono risultati anche sui livelli di potenza sonora stimati, i valori numerici sono riportati in Tabella 2.

Tabella 1 - Media e deviazione standard (std) dei SEL pre e post-correzione.

SEL Pre-correzione				
	Cruise Olbia	Cruise Bonaria	Zeus Palace	Tutti i traghetti
	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))
media	83.5	80.8	83.6	83.1
std	1.3	1.7	0.6	1.6
SEL Post-correzione				
	Cruise Olbia	Cruise Bonaria	Zeus Palace	Tutti i traghetti
	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))
media	83.9	83.9	83.6	83.9
std	1.0	1.1	0.6	0.9

Tabella 2 - Media e deviazione standard (std) dei livelli $L_{w/m}$ pre e post-correzione.

$L_{w/m}$ Traghetti		
	Traghetti PRE	Traghetti POST
	(dB(A))	(dB(A))
media	82.7	83.1
std	2.0	1.5

4. Discussioni e conclusioni

Le navi in movimento come sorgente di rumore sono state studiate solo negli ultimi anni, nei quali si è posta maggiore attenzione al rumore portuale. Infatti, le aree residenziali prossime ai porti possono essere soggette ad inquinamento acustico di origine portuale. Per valutare propriamente l'esposizione al rumore dei cittadini è necessaria una mappatura acustica dettagliata con un'accurata descrizione dei dati di ingresso al modello di calcolo. A questo proposito, in un precedente lavoro [40] sono state fornite le potenze sonore, in banda larga e in bande di terzi d'ottava, di alcune categorie di navi.

Il presente lavoro è partito dalla creazione di un database derivato da misure in continua, durate alcuni mesi ed effettuate al canale di accesso del Porto industriale di Livorno, da registrazioni di videosorveglianza e dai dati di traffico navale forniti dall'Autorità Portuale di Livorno. Le immagini di videosorveglianza sono state usate per calcolare la velocità di transito delle navi e stimare la minima distanza dalla posizione del microfono delle stesse. I valori di L_{Aeq} , SEL, spettro misurati e il pescaggio di ogni transito sono stati usati per completare il database.

Anche se solitamente dei singoli passaggi della medesima nave producono livelli di rumore paragonabili, questo studio ha mirato a minimizzare l'incertezza associate all'emissione sonora della categoria dei traghetti e ad indagare gli effetti di pescaggio e velocità, tenendo in considerazione la distanza della sorgente dal microfono. Una regressione multilineare è stata applicata ai dati di tre differenti traghetti al fine di valutare la correlazione con i parametri considerati.

Il primo risultato significativo è che il pescaggio delle navi non è un parametro rilevante nella rumorosità prodotta. Questo risultato è stato verificato per valori di pescaggio tra i 6.2 m e i 7.2 m, per la categoria dei traghetti analizzati e alle velocità di transito in porto. Il pescaggio potrebbe risultare significativo per navi di dimensioni maggiori, come le portacontainer, su cui è programmato uno studio futuro che valuterà nuovamente eventuali effetti del pescaggio sul rumore prodotto.

D'altro canto, la velocità è un parametro che incide sul livello di emissione sonora della sorgente navale. La distanza è un parametro che non influenza direttamente la potenza sonora ma è molto importante nella propagazione e nell'attenuazione, fondamentale per valutare i livelli di rumore ad eventuali ricettori. Per questo motivo, grazie alla regressione multipla effettuata, è stato possibile correggere i livelli di rumore misurati ottenendo una stima del livello di potenza sonora.

Usando i dati corretti per distanza ed escludendo il pescaggio è stato possibile osservare la dipendenza del rumore prodotto dalle navi in funzione della velocità di transito. Questa dipendenza è stata verificata solo nell'intervallo di velocità studiato, con valori tra 4.8 e 9.3 nodi (2.5÷4.8 m/s), che comunque rappresenta bene quanto verificato in ambito portuale. Sicuramente

ulteriori studi sarebbero necessari per movimenti in mare aperto, per quanto il loro interesse risulterebbe inferiore nell'ambito della valutazione del rumore che interessi i centri abitati in quanto si collocherebbero a grandi distanze. Inoltre, la dipendenza dalla velocità potrebbe anche mascherare la dipendenza da ulteriori parametri non presi in considerazione, per cui sarebbe certamente necessario uno studio specifico e più approfondito.

Quanto ottenuto riguardo all'effetto della velocità di transito può risultare importante in fase di programmazione e gestione dell'ambito portuale, così come risulta molto utile ai fini delle mappature acustiche. In effetti, nel presente studio si mostra come la conoscenza delle velocità medie di transito può portare ad una modellizzazione più precisa. Si mostra inoltre che la mancanza di informazione riguardo alla velocità può risultare in un errore massimo di 1 dB(A), usando come riferimento il valor medio di questo lavoro. Uno sviluppo futuro di questo lavoro riguarderà delle imbarcazioni di dimensioni inferiori, che solitamente coprono un intervallo più ampio di velocità. Questo tipo di natanti sono, di fatti, trascurati ma il loro contributo al livello di rumore complessivo può essere significativo nei porti turistici.

Grazie alla correzione per distanza è stato possibile ottenere una migliore stima della potenza sonora dei traghetti rispetto al lavoro precedente [40], passando da 83.1 ± 1.5 dB(A) a 82.7 ± 2.0 dB(A). Inoltre, il corretto posizionamento della sorgente sonora all'interno del modello è un fattore importante nella valutazione dei livelli di rumore a distanza. La mancanza di informazione riguardo all'altezza della sorgente, il cui contributo è stimato in un errore sulla distanza massimo di 3 m, rientra nell'incertezza stimata e non è stato determinante nella stima della potenza sonora in questo lavoro. Tuttavia, conoscere la corretta altezza della sorgente potrebbe essere importante nei modelli di propagazione a grande distanza soprattutto per effetto di eventuali ostacoli solidi particolarmente elevati.

Le bande di frequenze tra 500 Hz e 2.5 kHz hanno mostrato maggiore correlazione con la velocità di transito delle navi, mentre le altre non sono risultate rilevanti. In effetti, da sorgenti come i sistemi di raffreddamento e ventilazione, che potrebbero essere importanti ad alte frequenze (> 2.5 kHz) oppure eventuali rumori strutturali dello scafo, che potrebbero indurre rumore a bassa frequenza (< 500 Hz), non ci si aspetta una dipendenza dalla velocità.

Questo lavoro si pone come punto di partenza per futuri sviluppi, in particolare tenendo in considerazione altre tecniche come, ad esempio, l'uso di una *acoustic camera* che usa il metodo del *beam forming* e che, associandone l'uso a tradizionali misure di rumore in classe I, potrebbe rivelarsi molto utile nell'identificazione, nella localizzazione e nella caratterizzazione delle sorgenti sonore di una nave in maniera più dettagliata.

Bibliografia

1. Naletina, D.; Perkov, E. The economic importance of maritime shipping with special reference on Croatia. Economic and Social Development. In Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Economic and Social Development, Melbourne, Australia, 9–10 February 2017; p. 248.
2. United Nations. *Review of Maritime Transport-2019*; United Nations Conf. Trade Develop: New York, USA, 2019.
3. Murphy, E.; King, E.A. An assessment of residential exposure to environmental noise at a shipping port. *Environ. Int.* **2014**, *63*, 207–215, doi:10.1016/j.envint.2013.11.001.
4. Paschalidou, A.K.; Kassomenos, P.; Choniani, F. Strategic Noise Maps and Action Plans for the reduction of population exposure in a Mediterranean port city. *Sci. Total Environ.* **2019**, *654*, 144–153, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.048.
5. Licitra, G.; Bolognese, M.; Palazzuoli, D.; Fredianelli, L.; Fidecaro, F. Port noise impact and citizens' complaints evaluation in RUMBLE and MON ACUMEN INTERREG projects. In Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, Montreal, QC, Canada, 7–11 July 2019.
6. Guski, R.; Schreckenberg, D.; Schuemer, R. WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and annoyance. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2017**, *14*, 1539, doi:10.3390/ijerph14121539.
7. Beutel, M.E.; Brähler, E.; Ernst, M.; Klein, E.; Reiner, I.; Wiltink, J.; Hahad, O. Noise annoyance predicts symptoms of depression, anxiety and sleep disturbance 5 years later. Findings from the Gutenberg Health Study. *Eur. J. Public Health* **2020**, *30*, 516–521, doi:10.1093/eurpub/ckaa015.
8. Lechner, C.; Schnaiter, D.; Bose-O'Reilly, S. Combined Effects of Aircraft, Rail, and Road Traffic Noise on Total Noise Annoyance—A Cross-Sectional Study in Innsbruck. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 3504, doi:10.3390/ijerph16183504.
9. Licitra, G.; Fredianelli, L.; Petri, D.; Vigotti, M.A. Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Sci. Total Environ.* **2016**, *568*, 1315–1325, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.11.071.
10. Erickson, L.C.; Newman, R.S. Influences of background noise on infants and children. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* **2017**, *26*, 451–457, doi:10.1177/0963721417709087.
11. Minichilli, F.; Gorini, F.; Ascari, E.; Bianchi, F.; Coi, A.; Fredianelli, L.; Cori, L. Annoyance judgment and measurements of environmental noise: A focus on Italian secondary schools. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 208, doi:10.3390/ijerph15020208.
12. Steven, S.; Frenis, K.; Kroeller-Schoen, S.; Kalinovic, S.; Helmstaedter, J.; Kvandova, M.; Munzel, T.; Oelze, M.; Daiber, A. P4478 Noise pollution exacerbates the development of arterial hypertension via additive oxidative stress and impairment of NO signaling. *Eur. Heart J.* **2019**, *40*, 745–873, doi:10.1093/eurheartj/ehz745.0873.
13. van Kamp, I.; Simon, S.; Notley, H.; Baliatsas, C.; van Kempen, E. Evidence Relating to Environmental Noise Exposure and Annoyance, Sleep Disturbance, Cardio-Vascular and Metabolic Health Outcomes in the Context of IGCB (N): A Scoping Review of New Evidence. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 3016, doi:10.3390/ijerph17093016.
14. Recio, A.; Linares, C.; Banegas, J.R.; Díaz, J. Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. *Environ. Res.* **2016**, *146*, 359–370, doi:10.1016/j.envres.2015.12.036.
15. Directive, E.U. Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Off. J. Eur. Communities L* **2002**, *189*, 2002.
16. Oltean-Dumbrava, C.; Watts, G.; Miah, A. Towards a more sustainable surface transport infrastructure: A case study of applying multi criteria analysis techniques to assess the sustainability of transport noise reducing devices. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 2922–2934, doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.096.
17. Kaewunruen, S.; Martin, V. Life cycle assessment of railway ground-Borne noise and vibration mitigation methods using geosynthetics, metamaterials and ground improvement. *Sustainability* **2018**, *10*, 3753, doi:10.3390/su10103753.
18. Tian, Y.; Wan, L.; Ye, B.; Yin, R.; Xing, D. Optimization Method for Reducing the Air Pollutant Emission and Aviation Noise of Arrival in Terminal Area. *Sustainability* **2019**, *11*, 4715, doi:10.3390/su11174715.

19. Danihelová, A.; Němec, M.; Gergeľ, T.; Gejdoš, M.; Gordanová, J.; Ščensný, P. Usage of Recycled Technical Textiles as Thermal Insulation and an Acoustic Absorber. *Sustainability* **2019**, *11*, 2968, doi:10.3390/su11102968.
20. Praticò, F.G.; Fedele, R.; Vizzari, D. Significance and reliability of absorption spectra of quiet pavements. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *140*, 274–281, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.130.
21. Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental (*Automatic Tool for Environmental Diagnosis*), LIFE02 ENV/E/000274; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2005.
22. Eco.Port Project (cod. 41). EU Co-Financed Project through the European Regional Development Fund (ERDF) in the Framework of the Adriatic New Neighbourhood Program INTER-REG/CARDS-PHARE 2000–2006. Available online: <https://www.port.venice.it/it/progetto-eco-port.html> (accessed on 1 July 2020). (In Italian)
23. NoMEPorts 2008. *Noise Management in European Ports*, LIFE05 ENV/NL/000018, *Good Practice Guide on Port Area Noise Mapping and Management. Technical Annex*; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2008.
24. SIMPYC 2008. *Sistema de Integración Medioambiental de Puertos y Ciudades (Environmental integration for ports and cities)*, LIFE04 ENV/ES/000216; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2008.
25. EcoPorts 2011. EcoPorts Project, Information Exchange and Impact Assessment for Enhanced Environmental-Conscious Operations in European Ports and Terminals, FP5. Available online: http://cordis.europa.eu/project/rcn/87079_en.html (accessed on 1 July 2020).
26. Schenone, C.; Pittaluga, I.; Borelli, D.; Kamali, W.; El Moghrabi, Y. The impact of environmental noise generated from ports: Outcome of MESP project. *Noise Mapp.* **2016**, *3*, doi:10.1515/noise-2016-0002.
27. Alsina-Pagès, R.M.; Socor, J.C.; Bergadà, P. The impact of man-made noise on the passenger transport stations of Port of Barcelona. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2019; Volume 259, No. 3, pp. 6912–6922.
28. Santander, A.; Aspuru, I.; Fernandez, P. OPS Master Plan for Spanish Ports Project. Study of potential acoustic benefits of on-Shore power supply at berth. In *Proceedings of the Euronoise 2018, Heraklion-Crete, Greece*, 27–31 May 2018.
29. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Acoustical impact of the ship source. In *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration*, Beijing, China, 13–17 July 2014; pp. 13–17.
30. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Airborne noise emissions from ships: Experimental characterization of the source and propagation over land. *Appl. Acoust.* **2016**, *104*, 158–171, doi:10.1016/j.apacoust.2015.11.005.
31. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Noise emitted from ships: Impact inside and outside the vessels. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2012**, *48*, 868–879, doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.1064.
32. Witte, J. Noise from moored ships. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2010; Volume 2010, pp. 3202–3211.
33. Di Bella, A.; Tombolato, A.; Cordeddu, S.; Zanolto, E.; Barbieri, M. In situ characterization and noise mapping of ships moored in the Port of Venice. *J. Acoust. Soc. Am.* **2008**, *123*, 3262, doi:10.1121/1.2933567.
34. Neptunes Project. Available online: <https://www.neptunes.pro/> (accessed on 1 July 2020).
35. Schenone, C.; Borelli, D.; Pallavidino, E.; Yousseu, A.; Gaggero, T.; Waffo, E. The Port Noise Analysis and Control in Interreg Italy-France Maritime Programme. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2019; Volume 259, No. 4, pp. 5781–5792.
36. Bolognese, M.; Fidecaro, F.; Palazzuoli, D.; Licitra, G. Port noise and complaints in the north tyrrhenian sea and framework for remediation. *Environment* **2020**, *7*, 17, doi:10.3390/environments7020017.
37. Bernardini, M.; Fredianelli, L.; Fidecaro, F.; Gagliardi, P.; Nastasi, M.; Licitra, G. Noise Assessment of Small Vessels for Action Planning in Canal Cities. *Environments* **2019**, *6*, 31, doi:10.3390/environments6030031.
38. Di Bella, A.; Fausti, P.; Francesca, R.; Tombolato, A. Measurement methods for the assessment of noise impact of large vessels. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration*, Athens, Greece, 10–14 July 2016; pp. 1–7.
39. Fausti, P.; Santoni, A.; Martello, N.Z.; Guerra, M.C.; Di Bella, A. Evaluation of airborne noise due to navigation and manoeuvring of large vessels. In *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration*, London, UK, 23–27 July 2017.

40. Fredianelli, L.; Nastasi, M.; Bernardini, M.; Fidecaro, F.; Licitra, G. Pass-by characterization of noise emitted by different categories of seagoing ships in ports. *Sustainability* **2020**, *12*, 1740, doi:10.3390/su12051740.
41. IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics-Sound Level Meters-Specifications*; IEC: Geneva, Switzerland, 2013.
42. Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Holistic control of ship noise emissions. *Noise Mapp.* **2016**, *3*, 107–119, doi:10.1515/noise-2016-0008.
43. ISO/CD 11819-1 *Acoustics-Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise-Part 1: Statistical Pass-By method*; ISO: Geneva, Switzerland, 1997.
44. Licitra, G.; Cerchiai, M.; Teti, L.; Ascari, E.; Bianco, F.; Chetoni, M. Performance assessment of low-noise road surfaces in the Leopoldo project: Comparison and validation of different measurement methods. *Coatings* **2015**, *5*, 3–25, doi:10.3390/coatings5010003.

L'ANTENNE ACOUSTIQUE ET LE MONITORAGE EN MILIEU PORTUAIRE

Abstract

Le thème du bruit dans les ports reçoit de plus en plus d'attention en raison du plus grand nombre de plaintes de la part des personnes vivant dans les zones urbaines voisines. En outre, à la différence d'autres types de bruit tels que le rail, l'aéroport et la route, le cadre réglementaire actuel dans le secteur portuaire est dépourvu d'une structure adéquate et spécifique. À l'intérieur de ce contexte, l'objectif du document est décrire le fonctionnement et les caractéristiques de l'antenne acoustique, en approfondissant l'utilisation pour les mesures ambiantes et le relatif monitoring et caractérisation des sources sonores dans les aires portuaires

1. Introduction

Contrairement à d'autres types de bruit tels que le bruit ferroviaire, aérien ou routier, le bruit portuaire a longtemps été négligé sans la présence d'une norme de référence spécifique et consolidée. Ce n'est que récemment que ce phénomène a suscité un intérêt accru, principalement en raison de la réaction des habitants des villes portuaires qui ne tolèrent plus les troubles et les nuisances causées par le bruit provenant des ports.

L'impact acoustique portuaire est le résultat d'une complexe superposition de bruit causé par les bateaux, les grues, le chargement et le déchargement des marchandises, l'embarquement et le débarquement des personnes, les chantiers navals, de camions et de trains dans les périodes journalières que celles nocturnes [1].

À l'intérieur de ce contexte, soutenu d'une réglementation en matière de bruit portuaire insuffisante, l'utilisation d'un équipement innovant tel que l'antenne acoustique peut s'inscrire dans une réponse plus large pour faire face au bruit portuaire et offrir des solutions concrètes à la mise en œuvre et à l'optimisation de la surveillance acoustique dans des environnements extérieurs, pouvant en outre conduire à une conception et à des actions d'assainissement acoustique plus ciblées et efficaces .

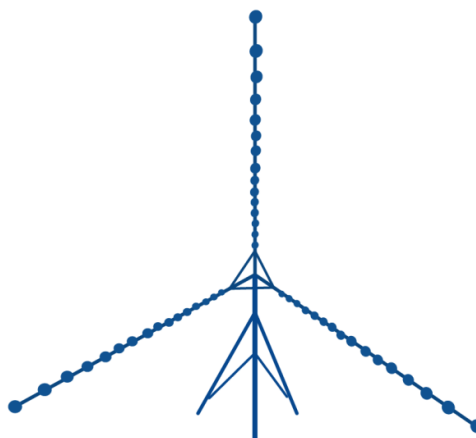


Figure 1 – Représentation d'une antenne acoustique

2. L'antenne acoustique : généralité

L'antenne acoustique est un instrument conçu pour localiser les sources sonores, où l'image acoustique, obtenue grâce à la **matrice de microphones**, est superposée à une image produite par une **caméra numérique**. En outre, à la différence d'un sonomètre classique, qui mesure le niveau sonore de l'environnement, mais qui n'identifie pas le positionnement de la source de bruit émise, une caméra acoustique peut détecter celle-ci grâce à ses caractéristiques et à la technique du beamforming. Le résultat est une "photo acoustique", dans laquelle on peut localiser la source du bruit et où les sons sont représentés en fonction de la fréquence au moyen de zones plus ou moins grandes en respectant une échelle chromatique.

Avant d'entrer dans les applications de l'antenne acoustique en domaine portuaire, introduisons deux thématiques fondamentales aptes à garantir une majeure compréhension de son fonctionnement :

- Transducteurs et matrices de microphones
- La technique du Beamforming



Figure 2 – Eléments constituant une antenne acoustique⁷

2.1. Transducteurs et matrices de microphones

Les microphones sont des transducteurs de signaux capables de convertir une grandeur de type mécanique en une grandeur de type électrique, traduisant une variation du champ de pression (ou champ acoustique) dans lequel ils sont immergés, en une variation de potentiel électrique. Afin d'obtenir un large rayon d'action, de capter un plus grand nombre de signaux et d'assurer une haute résolution, un certain nombre de microphones sont utilisés et disposés, en série ou en différentes configurations, selon les besoins, qui forment ensemble un "Microphones" (groupe microphonique). De plus, grâce à cette instrumentation et au support de la technique du

⁷ Nelle immagini modello Star48 AC Pro, gfai Tech; <https://www.acoustic-camera.com/en.html>

beamforming, il est possible d'effectuer des relevés acoustiques ciblés ou une acquisition simultanée de signal.

Voici les configurations possibles d'une matrice microphonique [2] :

- *Matrice linéaire* : constitué de microphones placés à une certaine distance sur une ligne droite ; ce type de tableaux ne peut offrir qu'une résolution en direction parallèle à l'axe des microphones.
- *Matrice plan* : constitué de microphones placés sur un plan (de géométrie très variable) et capables d'offrir une résolution dans un plan parallèle à celui des microphones.
- *Matrice sphérique* : constitué de microphones disposés en nombre variable sur une surface sphérique, il permet une résolution dans toutes les directions de l'environnement étudié.

A chaque configuration est associé un beampattern appelé aussi "réponse de directivité" ou "modèle de réponse en fréquence", qui, par représentation graphique, met en évidence le comportement d'une onde sonore incidente en fonction de la direction dans un plan spécifique et pour une fréquence précise. Les configurations de matrices varient selon les différents domaines d'application possibles, par exemple l'utilisation de matrices sphériques est adaptée pour des situations qui nécessitent une vue à 360 degrés de l'environnement étudié comme stades de football, mais aussi pour l'acoustique d'une pièce, en garantissant des mesures 3D.

En général, les microphones peuvent être déplacés en respectant des géométries particulières et parmi les plus utilisées nous trouvons : *géométrie à grille*, *géométrie casuelle*, *géométrie à forme spirale*, *géométrie sphérique*, *géométrie à demi-sphère* et *géométrie à croix*⁸ [3].

2.2. La technique du Beamforming

Parmi les méthodes utilisées pour obtenir une image acoustique de la mesure par microphone, on trouve le beamforming acoustique, une technique de traitement du signal basée sur des mesures de matrice de microphones en Far-Field et sur le principe de retard et de somme (delay and sum). L'algorithme de beamforming permet de localiser la source sonore la plus pertinente en exécutant un filtrage spatial qui permet de cartographier la distribution des sources à une certaine distance du tableau. Il s'ensuit une amélioration des capacités de capture du signal dans une direction particulière.

La technique du beamforming avec des matrices de microphones s'adapte bien à l'étude de sources sonores dans des environnements de particulière complexité, tels que les réalités portuaires. En outre, il est fondamental pour la localisation de sources sonores sur des objets en mouvement, mais il peut jouer un rôle majeur même pour des sources stationnaires. En effet, grâce aux matrices, le bruit de fond peut être supprimé, ce qui permet d'effectuer des recherches sur les sources même dans des conditions de bruit telles que la réverbération ou bruit provenant

⁸ Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel. : Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; p. 19

de l'environnement environnant. La méthode du Beamforming acoustique est un algorithme de traitement du signal qui permet d'isoler spatialement un son provenant d'une direction définie, créant ainsi un microphone directionnel orientable à partir d'une matrice microphonique de caractéristiques définies. Pour une meilleure compréhension de la technique du beamforming, voir figures 3 et 4. Dans la première on peut observer un schéma simplifié d'un système planaire composé d'un certain nombre de microphones dans lesquels une onde (supposée dans ce cas plane) arrive perpendiculaire au déploiement et dans l'autre cas avec un angle différent de 90 degrés. Dans le premier cas, l'onde est vue avec la même phase sur tous les microphones et donc la somme des signaux de ceux-ci reproduit fidèlement l'onde incidente ; Dans le second cas, par contre, la différence de phase par laquelle l'onde est vue par les différents microphones génère une somme atténuée par rapport à la précédente, et dépendante de l'angle incident. En passant à la figure 4, en particulier dans la représentation d'onde plane incidente avec un angle différent de 90°, en introduisant des 'retards' spécialement calculés (différents pour chaque microphone et pour chaque fréquence analysée), entre le transducteur individuel et il est possible d'orienter virtuellement le tableau afin d'obtenir une somme en phase, pour une direction différente de la direction perpendiculaire et d'obtenir la largeur originale de la source.

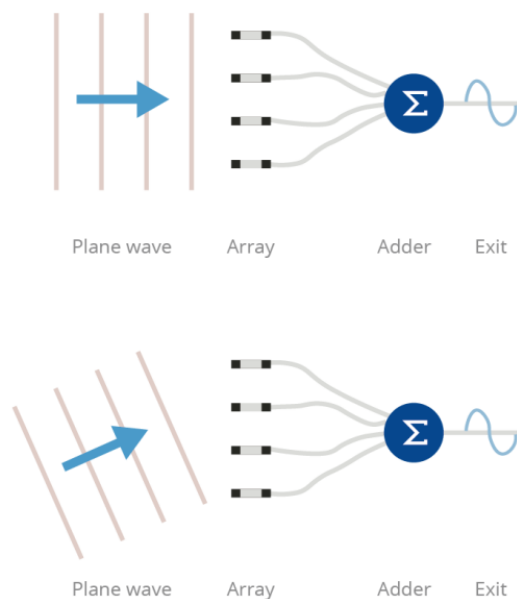


Figura 3 – Schématisation de matrice de microphones

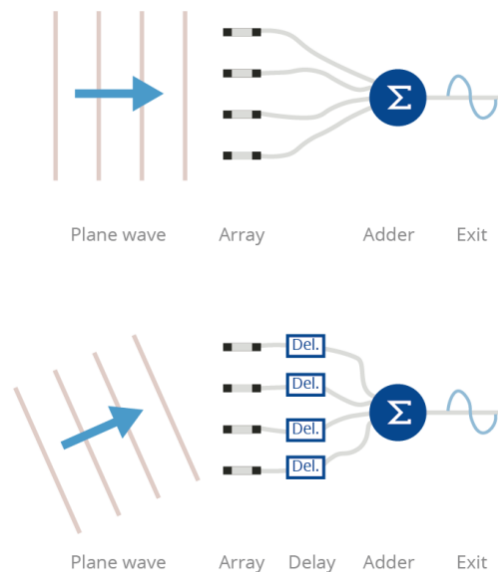


Figure 4 – Schématisation de matrice de microphones avec orientation “virtuelle” de la matrice

Par conséquent, grâce à la possibilité d’orienter par calculs le transducteur directionnel obtenu, il est possible de mesurer rapidement le bruit provenant de différentes directions pour calculer la carte acoustique au moyen d’interpolations entre les différents versets mesurés. L’implémentation réelle de l’algorithme de calcul est très complexe en raison de la nécessité d’obtenir des retards différents en fonction des différentes directions, des fréquences considérées, et de la position des microphones, aspect qui ne concerne pas de toute façon l’utilisateur du système⁹ [3].

⁹ Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel. : Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; pp. 19-23

3. Application de l'antenne acoustique et le milieu portuaire

L'antenne acoustique grâce à sa polyvalence peut être utilisée dans différents contextes aussi bien pour l'intérieur que pour l'extérieur, en particulier pour ces derniers nous trouvons ses applications par exemple pour :

- Processus de construction et nuisances sonores sur les chantiers
- L'étude des bruits produits à l'aéroport avec les différents modèles d'aéronefs
- Localisation des sources de bruit et réduction du bruit dans les installations industrielles
- L'étude du bruit provenant des turbines éoliennes
- Etude et caractérisation du bruit portuaire

En ce qui concerne les ports maritimes, le bruit provenant de ces derniers est souvent source de troubles et de nuisances pour les riverains. Par rapport à d'autres sources de bruit telles que les chemins de fer, routes et aéroports, la réglementation relative au bruit portuaire est incomplète et dépourvue de lois particulières et au même temps l'augmentation du trafic maritime des dernières années a conduit les Autorités Portuaires à évaluer l'impact des activités portuaires sur la ville et sur l'ambiant sans pouvoir utiliser de lignes directrices ou de directives spécifiques [4]. Dans ce contexte général, l'absence de normes et de lignes directrices structurées pour l'utilisation de l'antenne acoustique [3] comme instrument de support pour les mesures en domaine portuaire et plus en général pour des actions de monitoring et caractérisation de sources sonores.

En outre, depuis quelques années la rapide croissance des dimensions des bateaux, en particulier de croisière, conteneur et bateaux pétrolier, a comporté un changement dans l'évaluation de l'émission sonore à l'intérieur de l'aire portuaire. En particulier, la présence de spécifiques standards de mesure des niveaux sonores d'un bateau est focalisée sur l'utilisation de méthodes pour particulières typologies de bateaux et en général de petites dimensions, rendant difficile l'application de ces mesures pour les navires plus grands [5]. Bien que les procédures de mesure puissent être adaptées en fonction de la forme du navire, il est souvent difficile d'évaluer la distance optimale entre le point de mesure et la source sonore, lorsqu'il est difficile d'obtenir une estimation précise du point d'émission maximal, avantageux pour modéliser une bonne propagation du bruit ambiant. Les dimensions de certains types de navires ne permettent pas de mesurer correctement la source sonore. Pour pallier ces difficultés, il est possible d'appliquer un processus de calcul inverse à partir de mesures expérimentales effectuées par rapport à différentes normes pour l'évaluation du bruit ambiant. Une connaissance précise du point d'émission sonore et de la directivité de la source est essentielle pour garantir une application correcte de la méthode. Dans ces contextes, l'application de la technique du beamforming à l'aide l'antenne acoustique peut être un bon outil pour identifier les points d'émission et caractériser au mieux la source sonore, passant d'une approche qualitative à une approche quantitative afin d'identifier la source également en termes de niveau de puissance acoustique. Par conséquent

l'utilisation de tel instrumentation peut fournir une réponse efficace à deux des problématiques de majeure importance en milieu portuaire, soit celle de la difficulté d'identifier la contribution spécifique de chaque source sonore en raison de la multitude de sources concurrentes, et de pouvoir identifier avec précision des sources situées à des distances considérables.

3.1. Cas d'étude en milieu portuaire

Afin d'évaluer l'efficacité de la chambre acoustique ont été effectuées des mesures au cours d'une journée dans trois localités différentes à l'intérieur du port de Gênes, en utilisant les matrices microphoniques Star48 AC (fréquence d'échantillonnage 48,0 kHz), pendant que pour acquérir, Le stockage et le traitement des informations collectées ont été effectués sur un ordinateur personnel conçu avec le logiciel Noiseimage 4.2.12 pour l'analyse acoustique.

En général, la procédure suivie peut être divisée en trois phases :

- a) Préparation de l'équipement par le montage et son calibrage
- b) Mesure avec enregistrement de l'activité portuaire d'intérêt
- c) Analyse des données, extrapolation, à l'aide du logiciel
 - o Vidéo acoustique
 - o Photographie acoustique
 - o Spectre et spectrogramme

En ce qui concerne c), on a évalué la localisation de la source, les fréquences en jeu par rapport aux niveaux de pression acoustique et analysé les variations de fréquence en fonction du temps.

Des résultats expérimentaux obtenus, est confirmée la complexité de l'environnement portuaire où il est possible d'identifier différentes sources sonores qui peuvent être classifiées par durée, intensité, position et contenu spectral. L'utilisation de la chambre acoustique a mis en évidence comme son point de force l'identification de sources soit en mouvement que stationnaires, en détectant position et niveau de pression et puissance sonore. En même temps, il est nécessaire de déterminer la distance de la source à l'aide d'instruments spéciaux, ce qui se complique en présence de nombreux objets. En général, l'antenne acoustique s'est révélée être un instrument applicable et utile pour la surveillance et la caractérisation de sources sonores à l'intérieur de l'environnement portuaire, en effectuant des études à la fois de caractère qualitatif et quantitatif. L'analyse exécutée permet de supporter la rédaction de premières lignes guide pour l'application de la chambre acoustique à l'intérieur de l'environnement portuaire. Voir le paragraphe suivant pour plus d'informations.

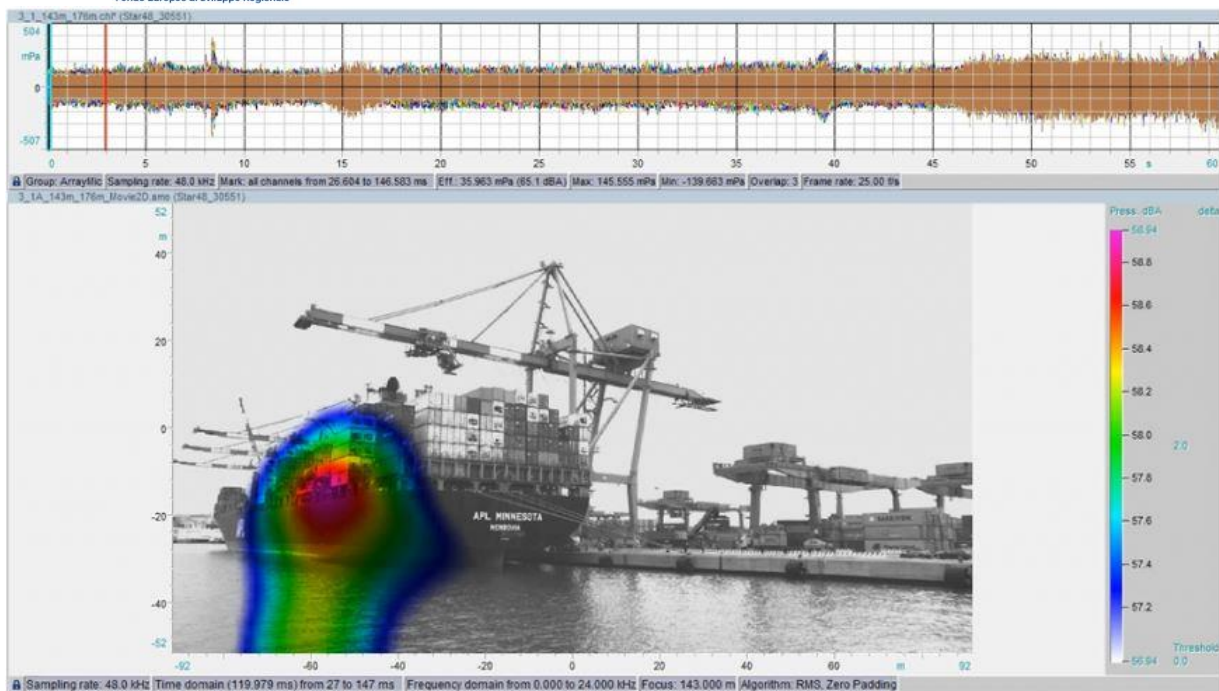


Figure 5 - photo acoustique obtenue à travers l'utilisation de l'antenne acoustique

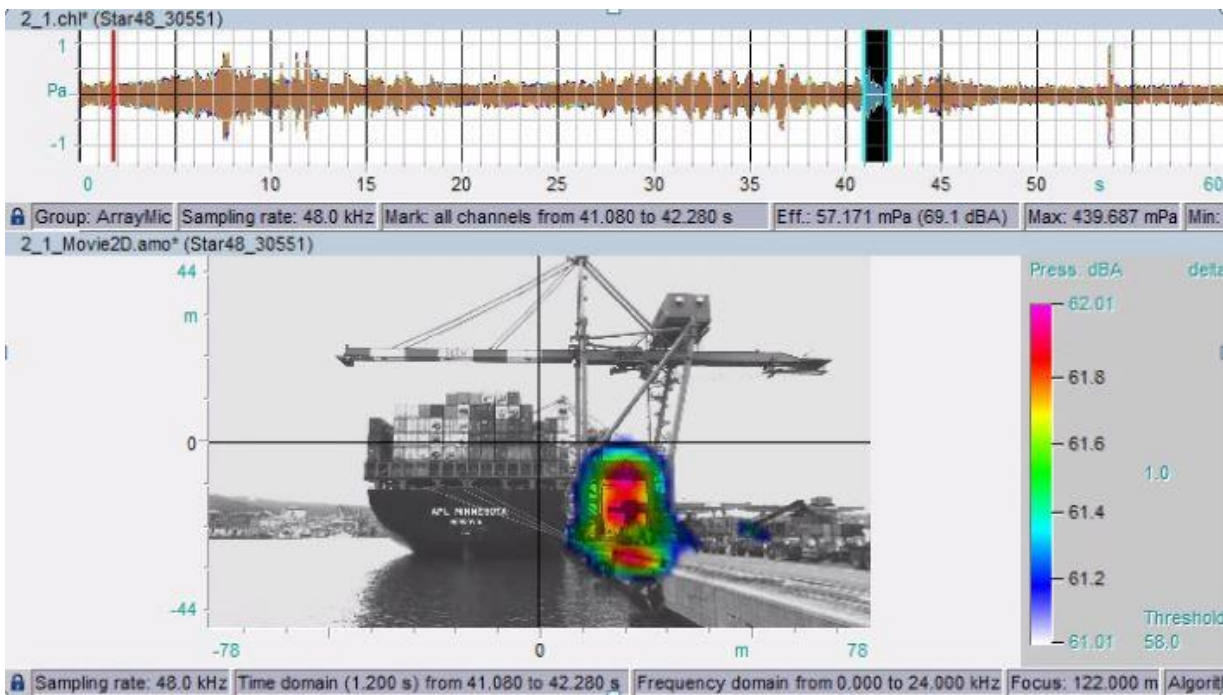
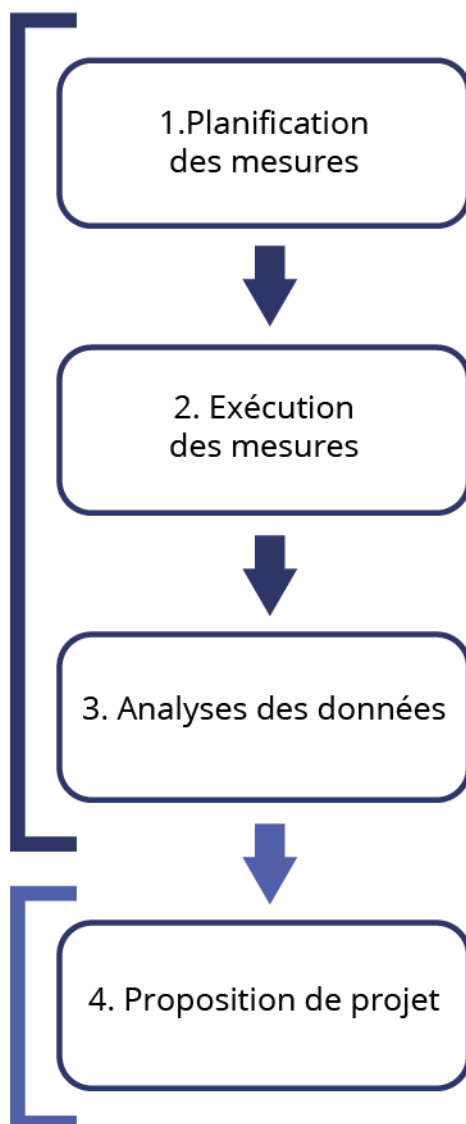


Figure 6 - photo acoustique obtenue à travers l'utilisation de l'antenne acoustique.

4. Proposition pour un standard de mesure en milieu externe

Sont rapportées ci - dessous des lignes directrices pour effectuer des mesures avec l'antenne acoustique en domaine portuaire et plus en général en milieu externe ¹⁰ [3] :



¹⁰Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel. : Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli; pp. 60-62

1. Planification des mesures

Analyses préliminaires sur site pour planifier de façon qualitative :

- Analyse des conditions météorologiques
- Analyse de l'état des lieux et de la configuration de l'environnement où les mesures sont prévues, en identifiant les sources possibles de bruit prédominant
- Analyse du positionnement de l'équipement afin de garantir également la sécurité pour l'opérateur et le respect des distances minimum/maximum pour le bon fonctionnement de la matrice

Choix de la matrice de microphones pour la mesure et de **tout équipement** en fonction des points énumérés ci-dessus. En particulier :

- Définition des paramètres techniques du tableau, algorithme beamforming, étalonnage des données par rapport au scénario étudié
- Forme de la matrice -> configuration de la matrice
- Pour des mesures prolongées munies de dispositifs de mémoire élevée pour enregistrer les données
- Planification du temps de mesure

2. Exécution des mesures

- Prédiposition à l'utilisation de l'antenne acoustique
- Mesure de la distance source - récepteur à l'aide d'instruments appropriés pour le calcul correct de la puissance acoustique
- Étalonage de l'instrument à l'aide d'une source portable placée à une distance connue ou en s'appuyant sur d'autres normes pour l'étalonnage des transducteurs, ou au moyen du module offert par le fabricant.

Création des enregistrements sonores :

- Effectuer les mesures de différentes façons (espace, temps) selon le scénario
- Effectuer des mesures (si nécessaire) tant journalières que nocturnes

3. Analyses des données

Traitement

Analyse des enregistrements à travers le software pour l'extraction des données.

- Identification des sources principales et secondaires
- Ecoute directe du signal
- Photo acoustique 2D, 3D et reproduction
- Photo spectrale et reproduction,
- Film acoustique et reproduction
- Spectre FFT et / ou 1/3 d'octave
- Spectrogrammes avec filtrage et reproduction du signal filtré
- Estimation des erreurs de mesure par comparaison des données avec d'autres instruments.
- Estimation de la puissance acoustique après correction des erreurs

Caractérisation des sources

En fonction de l'étude étudiée, caractériser les sources mesurées à partir des données extraites. En particulier, les aspects suivants :

- Type source
- Source stationnaire ou en mouvement
- Localisation, photo acoustique
- Durée de l'événement
- Heure de début et de fin
- Événement périodique, singulier, continu
- Caractéristique de la fréquence
- Définition de la distance
- Lw, dB – dB(A)

Pour approfondir quelques analyses axées sur des pièces individuelles, on peut utiliser un instrument plus adapté au near-field.

4. Proposition de projet

Après analyse des données, si nécessaire, on peut passer à la phase de proposition de projet afin d'assurer une amélioration en termes acoustiques du scénario étudié, dans le respect des standards, des lignes directrices et de la norme de référence, déterminant ainsi une solution possible du problème en termes de coût, de faisabilité, de temps.

Équipement recommandé

- Cartes satellitaires, relevés, cartes informatives pour le calcul des distances
- Ordinateur portable équipé de matériel de performance en cas d'analyse directe sur site
- Dispositif d'étalonnage des microphones
- Périphérique de stockage (préférable un SSD)
- Enregistreur de données pour l'échantillonnage des signaux
- Dispositif de mesure de distance en cas de sources non stationnaires
- Générateur s'il n'y a pas d'alimentation électrique
- Câblage adapté à la situation en termes de longueur et de performances
- Protections en cas de mauvais temps ou accessoires utiles en condition de vent

5. Conclusions

L'antenne acoustique peut être utilisé efficacement pour mesurer le bruit à l'extérieur, en particulier en présence de plusieurs sources concurrentes. En outre, la possibilité d'effectuer des mesures acoustiques sur des sources distantes élargit le marché de la chambre acoustique, en le rendant un type d'instrumentation polyvalent et adaptable à différentes réalités et environnements. Dans le même temps, l'absence de normes et de lignes directrices spécifiques conduit à ne pas exploiter au maximum les potentialités de cette technologie, en raison aussi de l'absence de méthodes spécifiques pendant la phase de recueil de données acoustiques.

La présentation de lignes directrices générales peut constituer un point de départ pour contribuer à l'émergence de normes spécifiques et à l'expansion de l'utilisation de la chambre acoustique, tout en garantissant des approches de type quantitatif à l'étude des sources.

Bibliographie

1. Diego Palazzuoli; Gaetano Licitra; «Report sulle carenze dello stato dell'arte» (Prod. T1.2.1), 2018; Progetto Report, PC Interreg IT-FR Marittimo 14-20
2. Lorenzo Ferri; «Il metodo del beam-forming acustico», tesi di laurea; UNIBO; 2015; pp. 21-22; rel.: Prof. Fabio Ortolani; https://amslaurea.unibo.it/8735/1/ferri_lorenzo_tesi.pdf
3. Klaidi Papri; «Misure di rumore ambientale con acoustic camera», tesi di laurea; UNIGE; 2020; rel.: Prof. Corrado Schenone; Prof. Davide Borelli;
4. Matteo Bolognese et al., «Port Noise and Complaints in the North Tyrrhenian Sea and Framework for Remediation», Environments 7, n. 2 (24 febbraio 2020): 17, <https://doi.org/10.3390/environments7020017>
5. Antonino Di Bella, Francesca Remig, «Measurement methods for the assessment of noise impact of large vessels»

ÉTUDE DES PARAMÈTRES QUI INFLUENT LE BRUIT ÉMIS PAR LES NAVIRES EN MOUVEMENT DANS LES ZONES PORTUAIRES

MARCO NASTASI (1), LUCA FREDIANELLI (1), MARCO BERNARDINI (2), LUCA TETI (3), FRANCESCO FIDECARO (1), GAETANO LICITRA (4).

- 1) Département de Physique "Enrico Fermi", Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, m.nastasi@studenti.unipi.it (M.N.); fredianelli@df.unipi.it (L.F.); francesco.fidecaro@unipi.it (F.F.)
2) CNR-INM Section of Acoustics and Sensors O.M. Corbino, via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Rome, Italy; marcobernardini.s@gmail.com
3) iPOOL S.r.l., via Cocchi 7, 56121 Pisa, Italy; luca.teti@i-pool.it
4) Agence régionale pour la protection de l'environnement de la Toscane, 56127 Pisa, g.licitra@arpat.toscana.it

Abstract

Après plusieurs années d'ignorance, le bruit n'a été pris en compte que récemment dans les études de durabilité environnementale des infrastructures portuaires. Les projets du programme INTERREG MARITIME ont soulevé des problèmes qui ont été négligés jusqu'à présent, tels que le manque de législation appropriée et l'évaluation de l'exposition des citoyens au bruit. Malgré la grande présence et la variété des sources de bruit dans les ports, nombre d'entre elles ne sont pas encore correctement caractérisées d'un point de vue acoustique. Les projets INTERREG ont donné une impulsion à la recherche dans ce domaine et certaines études ont traité du bruit produit par les navires se déplaçant à l'intérieur des ports. Ce travail part d'une campagne précédente de mesures visant à obtenir les niveaux de puissance acoustique, large bande et spectrale, de sources navales en mouvement et vise à étudier la variabilité constatée. Plus d'un mois de mesures de bruit en continu et d'enregistrements vidéo ont été analysés afin de préparer une base de données de départ la plus précise possible. Afin d'étudier l'influence de certains paramètres tels que la distance minimale de passage par rapport au point de mesure, la vitesse de transit et le tirant d'eau du navire sur l'émission sonore, une régression multilinéaire a été effectuée sur ceux-ci. Pour évaluer la distance de passage minimale, une méthodologie innovante a été introduite qui exploite les enregistrements vidéo et fournit des résultats avec une incertitude de 3 m. Savoir quel paramètre est le plus influent peut aider à planifier des campagnes de surveillance appropriées ou à proposer des lignes directrices. Le tirant d'eau des navires est moins influent que les autres paramètres dans l'émission sonore des ferries analysés, la distance et la vitesse ont été utilisées pour améliorer l'évaluation de la puissance acoustique des sources d'intérêt. Grâce à l'analyse spectrale et à la corrélation avec les paramètres à l'étude, il a été possible d'identifier la gamme de fréquences, entre 500 Hz et 2,5 kHz, la plus influente dans l'émission sonore des navires en transit. En référant les étapes à la même distance et vitesse de référence, il a été possible d'obtenir des résultats plus précis de 0,5 dB (A). Le positionnement correct de la source est particulièrement important dans le calcul de la propagation du bruit réalisé à travers des modèles de simulation acoustique dans le but d'évaluer le bruit dans les zones portuaires et dans les zones environnantes.

1. Introduction

Depuis l'Antiquité, le transport maritime est l'un des principaux moyens de transport de personnes et de marchandises. Avec le développement du trafic aérien, le transport longue distance a bénéficié d'un grand avantage en termes de vitesse, mais le trafic maritime conserve encore aujourd'hui un rôle primordial dans le commerce. Une grande partie de cette importance est certainement due à la grande quantité de marchandises que le transport maritime est capable de transporter, ce qui en fait un moyen plus lent mais certainement moins cher. De plus, le transport de combustibles fossiles ne serait pas possible autrement. Ce n'est pas un hasard si presque tous les pays l'utilisent dans leurs échanges avec le reste du monde [1].

Selon la *review* sur le transport maritime des Nations Unies [2], l'année 2018 a enregistré près de 12 milliards de tonnes de fret réparties entre porte-conteneurs, vraquiers, pétroliers et cargos dans le cadre du commerce maritime international. Ces chiffres représentent une augmentation du trafic de 2,7%, contre 4,1% en 2017. Parallèlement aux tensions géopolitiques entre les États-Unis et la Chine, les préoccupations environnementales ont été reconnues comme un facteur responsable de cette réduction du taux de trafic. croissance.

Considérant que le transport de passagers par ferries et paquebots de croisière fait également partie intégrante du trafic maritime, les implications concernent l'expansion des zones portuaires, l'augmentation des mouvements navals et l'implication de zones habitées proches des implantations portuaires opérationnelles et industrielles. Des manifestations de la ville ont déjà été documentées dans les zones portuaires de Dublin [3] et d'Athènes [4], ainsi que dans celles de La Spezia et de Nice [5].

Les manifestations sont également causées par le fait que la pollution sonore est l'un des plus grands impacts environnementaux, conduisant à une variété d'effets sur la santé largement documentés [6]: troubles du sommeil [7], agacement [8, 9], difficultés à dormir l'apprentissage [10, 11], l'hypertension [12], les maladies cardiovasculaires et respiratoires [13, 14] sont parmi les conséquences les plus fréquentes et les plus importantes.

Bien consciente des risques sanitaires induits par le bruit, l'Union européenne a déjà approuvé en 2002 la Directive Européenne 2002/49 / CE (END) [15], qui oblige les États Membres à produire des cartes et des plans d'action stratégiques sur le bruit pour les principales infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et des centres urbains tous les cinq ans. Le END était donc un encouragement à la communauté scientifique pour l'étude des émissions sonores, des cartes d'impact sonore sur le territoire et l'atténuation de l'impact lui-même [16-20].

Le bruit du port a été négligé par la END avec une marginalisation conséquente des travaux et des études à cet égard. En effet, peu de projets ou d'études [21-27] ont été réalisés sur la

caractérisation des sources portuaires, sur la cartographie du bruit ou sur les plans d'action et, enfin et surtout, sur l'évaluation de l'exposition de la population au bruit du port. Outre le manque d'études existantes, la complexité des zones portuaires rend souvent difficile la réalisation de campagnes de mesures. La taille des zones concernées, le grand nombre de sources présentes, souvent superposées, et les difficultés d'accès aux différentes zones pour des raisons de sécurité ne sont que quelques-uns des problèmes pour des études de ce type. De plus, la variété des sources est grande et chacune nécessite une caractérisation acoustique spécifique afin d'obtenir des données d'entrée adéquates et nécessaires pour la phase de cartographie.

À l'heure actuelle, on peut dire que l'étude du bruit naval est à l'état embryonnaire et il est important de suivre ce que des études récentes ont montré. L'émission sonore d'un navire varie selon qu'il est en mouvement ou non. Malgré le fait que les mesures d'un navire stationnaire puissent sembler faciles, la taille de l'objet, le nombre de sources avec leur variété de mécanismes de génération de bruit ont incité certains auteurs [28-33] et le projet NEPTUNES [34] pour proposer des méthodes de mesure du bruit produit par les navires arrêtés à quai. Un nouvel élan à cette recherche a été donné par le programme INTERREG Maritime Italie-France 2014-2020, qui comprend plusieurs projets visant à combler les lacunes des connaissances sur le bruit portuaire tout en identifiant les meilleures pratiques en matière de durabilité environnementale. À long terme dans la région de la mer Tyrrhénienne du Nord [35, 36]. Les navires en mouvement ont été moins étudiés, probablement en raison du fait que leurs itinéraires devraient être éloignés des zones habitées. Cependant, en particulier dans les villes dotées de canaux navigables [37, 38], voire dans les zones portuaires plus communes, le bruit produit par les navires peut atteindre les habitations. Alors que les navires de croisière modernes ont des machines plus modernes et plus silencieuses [39], d'autres types de navires ont été signalés comme sources d'émissions sonores importantes par Fredianelli et al. [40].

Dans les travaux précédents de Fredianelli et al. [40], les niveaux de puissance acoustique, large bande et spectrale, ont été reconstitués, grâce à l'analyse des mesures *pass-by* à long terme pour les navires *rollo-on/roll-off* (RORO), porte-conteneurs, pétroliers, camions-citernes de produits chimiques et ferries. En plus des difficultés mentionnées ci-dessus dans les mesures portuaires, un certain degré de variabilité des sources doit être pris en considération, étant donné que même une même source peut produire différents niveaux de bruit en fonction des différentes conditions. Pour ces raisons, les résultats présentés dans [40] présentent de grandes incertitudes.

Ce travail vise à expliquer les incertitudes liées aux niveaux de puissance acoustique des grands navires en mouvement et comment l'émission peut varier en fonction de la distance entre la source et le récepteur, ainsi que de la vitesse et du tirant d'eau du navire lui-même. Des mesures de bruit et des enregistrements vidéo ont été analysés afin d'exclure les transits perturbés d'autres sources sonores contemporaines. Les données préliminaires ont été fournies par le système d'information télématique du port de Livourne et la vitesse a été facilement obtenue à partir des images vidéo, tandis qu'en ce qui concerne l'estimation de la distance minimale du

navire par rapport au microphone, une méthodologie capable d'exploiter le enregistrements vidéo.

L'analyse a été effectuée séparément sur les transits répétés de trois ferries spécifiques pour réduire la variabilité liée aux caractéristiques des navires. Au final, une comparaison des résultats a été faite pour évaluer les émissions sonores de différents navires appartenant à la même catégorie.

Une régression multilinéaire a été effectuée pour évaluer l'effet de la distance source-microphone, de la vitesse et du tirant d'eau.

Afin de reconstruire la puissance sonore à partir des niveaux de bruit obtenus à partir des mesures analysées, le logiciel de simulation acoustique SoundPLAN v.8.1 a été utilisé. Dans la modélisation, la source navale mobile était représentée par une ligne d'émission sonore en analogie avec les sources modélisées routières ou ferroviaires. Les résultats permettent d'améliorer la qualité des *input* à utiliser dans les modèles acoustiques pour la cartographie et l'évaluation de l'exposition des citoyens au bruit. La connaissance, en outre, des paramètres les plus influents sur le bruit naval peut être utile pour les autorités chargées de la régulation des activités portuaires pour toute action d'atténuation acoustique ou le développement futur de zones portuaires plus calmes à proximité des habitations.

2. Matériaux et méthodes

Les mesures ont été effectuées à l'entrée du port industriel de Livourne entre le 24 mai et le 5 septembre 2018, un sonomètre de classe I a été utilisé, conformément aux recommandations de la norme CEI 61672-1 [41], et a été positionné une station météorologique (Figure 1). L'instrumentation a été positionnée sur le quai, à 1 m de l'eau, avec le microphone champ libre à une hauteur de 4 m, un casque coupe-vent de 90 mm a été utilisé. Les périodes de mesure avec vent supérieur à 5 m / s et celles de pluie ont été exclues de l'analyse selon les bonnes pratiques habituelles de mesure, il en a été de même pour les événements survenus avec des valeurs d'échelle de Beaufort supérieures à 3 [42]. Les transits des navires ont été mis en évidence en sélectionnant l'événement sonore à -10 dB (A) du niveau de crête. Pour chaque transit, le L_{Aeq} le SEL (*sound exposure level, niveau d'exposition sonore*) et les niveaux de spectre ont été calculés.



Figure 10 – Carte de la zone et de l'emplacement de la position de mesure.

Les critères d'obtention de SEL et L_{Aeq} ont été dérivés, par analogie, de l'ISO / CD 11819-1 [43], qui décrit une méthode d'évaluation du bruit du trafic routier à l'aide de mesures en bordure de route et est connue sous le nom de méthode SPB (Pass-By statistique). Le SPB est basé sur l'analyse d'un grand nombre de véhicules, en considérant des passages isolés acoustiquement, qui représentent le parc automobile réel en circulation, avec une mesure simultanée de la vitesse de déplacement sur route.

En adaptant la méthode aux objectifs de l'étude, les indicateurs utilisés sont légèrement différents de ceux prescrits par la norme précitée, une approche similaire à la norme SPB modifiée a été suivie [44].

Le positionnement de la mesure a été choisi de manière à garantir la proximité du chenal d'accès de la zone nord du port et la sécurité des équipements, sous vidéosurveillance et dans une zone avec système d'alarme. L'instrumentation a enregistré les transits de remorqueurs, de bateaux-pilotes, de ferries, de porte-conteneurs, de RORO, de chimiquiers et de pétroliers.

Le bruit de fond de la zone est principalement dû à la mer et au vent, ainsi qu'à la route la plus proche qui, étant à l'intérieur du port, n'est parcourue que par quelques poids lourds à basse vitesse dont les transits en même temps que les passages navals d'intérêt ont conduit à exclusion de l'analyse de ce dernier, réduisant la contamination de l'ensemble de données.

Grâce au système de vidéosurveillance de l'Autorité portuaire de Livourne, il a été possible de faciliter la reconnaissance des navires et de calculer la vitesse de passage. En croisant les données de trafic provenant du système d'information télématique du Port de Livourne, il a été possible d'identifier les fenêtres horaires, d'environ 40 minutes, des passages d'intérêt.

Du fait que les ferries ont des horaires précis d'arrivées et de départs, l'analyse n'a concerné que cette catégorie de navires, une autre raison du choix est que les ferries ont une plus grande homogénéité acoustique et représentent 10% du total des passages depuis le chenal placé à la surveillance. De plus, le nombre de navires différents a été réduit à trois unités, permettant ainsi l'analyse de plusieurs passages d'un même navire, cela a également été utile pour limiter la variabilité des sources sonores en fonction des caractéristiques intrinsèques du navire qui influencent l'émission sonore. global.

L'acquisition des données et l'analyse préliminaire des données de bruit, des enregistrements vidéo et des données de trafic ont conduit à la création d'une base de données contenant, pour chaque étape:

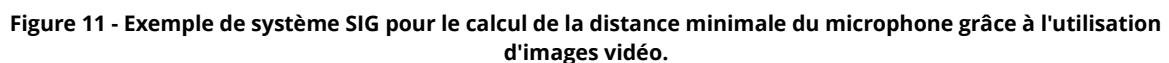
- nom du navire;
- dimensions physiques du navire;
- distance minimale du microphone;
- vitesse de transit;
- brouillon;
- L_{Aeq} ;
- SEL;
- spectre en tiers d'octave;
- date et heure du transfert;
- type de mouvement (départ ou arrivée).

La vitesse de transit a été calculée à partir des images vidéo; il est intéressant de noter que, bien qu'il y ait des limites imposées pour la vitesse de transit dans le port égale à 5 nœuds, les vitesses détectées varient dans un intervalle compris entre 4,8 et 9,3 nœuds ($2,5 \div 4,8$ m / s).

L'estimation de la distance était plutôt un défi intéressant à relever. Si en principe il est possible d'effectuer la mesure au moyen d'un laser mètre, dans le cas présent cela n'a pas été possible tant pour des raisons techniques que pour le besoin d'un opérateur, impossible pour des mesures à long terme telles que celles réalisées. Une alternative consiste à récupérer les données AIS (*système d'identification automatique*) mais il est nécessaire d'acheter ces données et le budget a été investi dans l'achat de données de trafic maritime. En conséquence, une méthode a été développée qui exploite les images de vidéosurveillance et qui fournit une estimation fiable avec une incertitude de 3 m, sur des distances de l'ordre de 50 m.

La méthode développée est basée sur les étapes suivantes, effectuées pour chaque transit unique examiné:

1. des références au sol ont été identifiées à la vue des images de vidéosurveillance;
2. les références ont été reportées sur un GIS (Système d'Information Géographique), afin d'identifier les coordonnées géographiques;
3. des lignes ont été tracées entre les points de référence et la position de la caméra prise en considération;
4. les points de référence identifiés ont été superposés aux vidéos;
5. l'image fixe du transit en question a été capturée lorsque le navire était en correspondance avec deux références;
6. connaissant la longueur totale du navire, il était possible, grâce à de simples considérations géométriques, de signaler un segment de longueur connue sur le système GIS;
7. cela a permis d'estimer la distance entre la trajectoire du navire et la position du microphone, en supposant que la ligne était parallèle au chenal.



En parallèle, une analyse a été menée sur les niveaux spectraux afin d'identifier la gamme de fréquences attribuable aux sources du navire.

Par analogie avec les modèles de trafic routier et ferroviaire, il a été décidé de modéliser la source navale mobile comme une ligne d'émission sonore. L'utilisation d'un modèle de simulation était nécessaire pour calculer les niveaux de puissance acoustique à partir de mesures de bruit (niveaux de pression acoustique), corrigés de manière appropriée grâce à l'étude des paramètres précités. De plus, de cette manière, un niveau de pression acoustique a été fourni qui peut être utilisé dans un modèle de simulation pour la propagation et le calcul de toutes les cartes de bruit et l'évaluation de l'exposition au bruit.

3. Résultats

Afin de quantifier les améliorations de la réduction des incertitudes sur les niveaux de puissance acoustique par rapport aux travaux précédents [40], l'analyse a été lancée en considérant l'ensemble des ferries et en calculant le niveau de puissance acoustique ($L_{W/m}$). Les niveaux de large bande (pondérés et linéaires) et le spectre sont indiqués à la Figure 3.

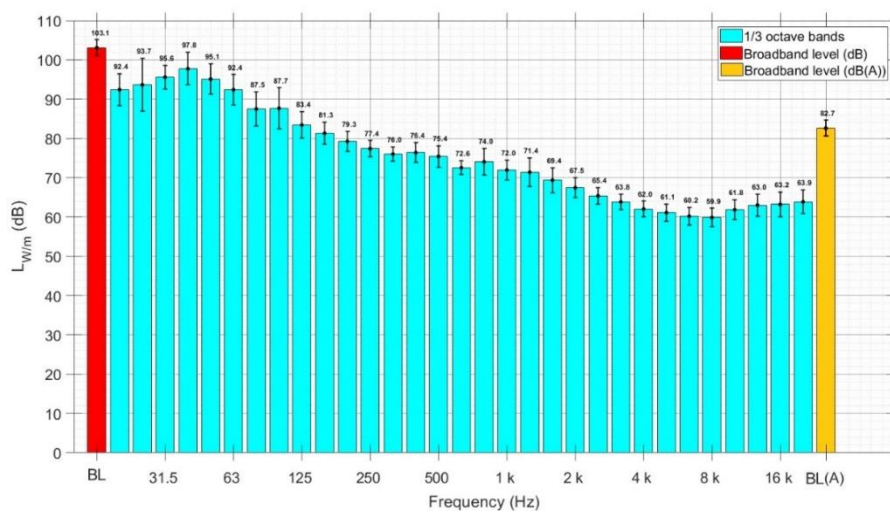


Figura 12 - Niveaux de $L_{W/m}$ et incertitude relative, large bande et spectre.

L'analyse de régression multivariée présentée dans la Figure 4 nous a permis de mieux comprendre les dépendances des niveaux de bruit sur les paramètres pris en compte, mettant en évidence une non-signification statistique du tirant d'eau qui, dans la suite, a été exclue de l'analyse.

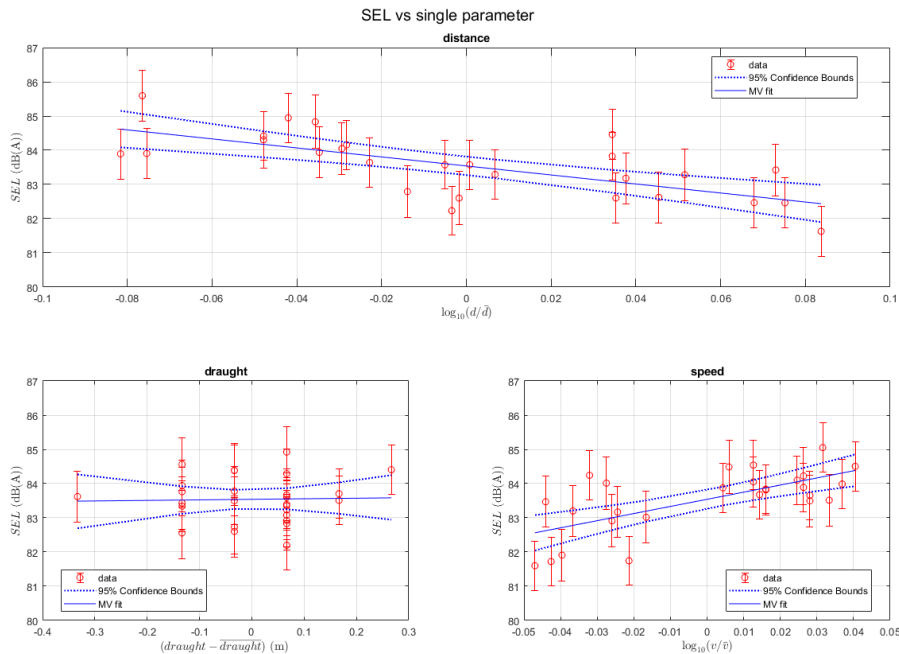


Figure 13 - Régression multiple sur le SEL des passages, en fonction de: distance minimale, vitesse de transit et tirant d'eau.

Par la suite, il a été possible de corriger les niveaux de pression mesurés en les renvoyant à des conditions de distance homogènes. Grâce à l'analyse multivariée et aux coefficients obtenus, toutes les étapes ont été recalculées en les ramenant à la distance de référence, égale à la moyenne de 47,1 m. De cette manière, la seule dépendance reste celle de la vitesse de transit, dont la référence égale à la valeur moyenne est de 3,9 m / s (7,5 nœuds).

La même procédure a également été appliquée à toutes les bandes de troisième octave du spectre, à la recherche d'une corrélation entre les niveaux de bruit et la vitesse. Les fréquences de corrélation inférieure à celle de la valeur large bande ont donc été exclues, obtenant la plage d'intérêt souhaitée qui s'est avérée aller de 500 Hz à 2,5 kHz, ces bandes sont sans doute les plus utiles pour caractériser le bruit produit par le transit de ferries. La figure 5 montre les tendances en fonction de la vitesse du niveau de bruit des bandes sélectionnées.

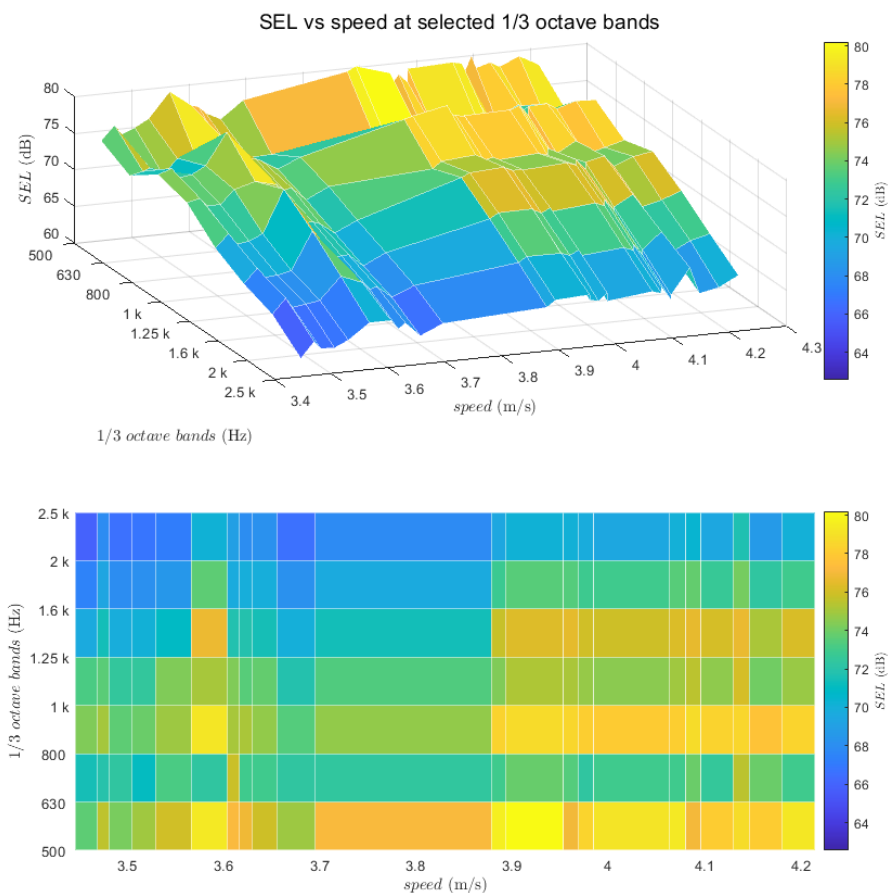


Figure 14 - Variation du SEL du spectre en fonction de la vitesse.

On peut voir que lorsque la vitesse augmente (vers la droite), les niveaux de bruit sont toujours plus élevés (couleurs plus chaudes).

Après la correction des niveaux de bruit, les niveaux de puissance acoustique ont été recalculés, les résultats sont présentés à la Figure 6.

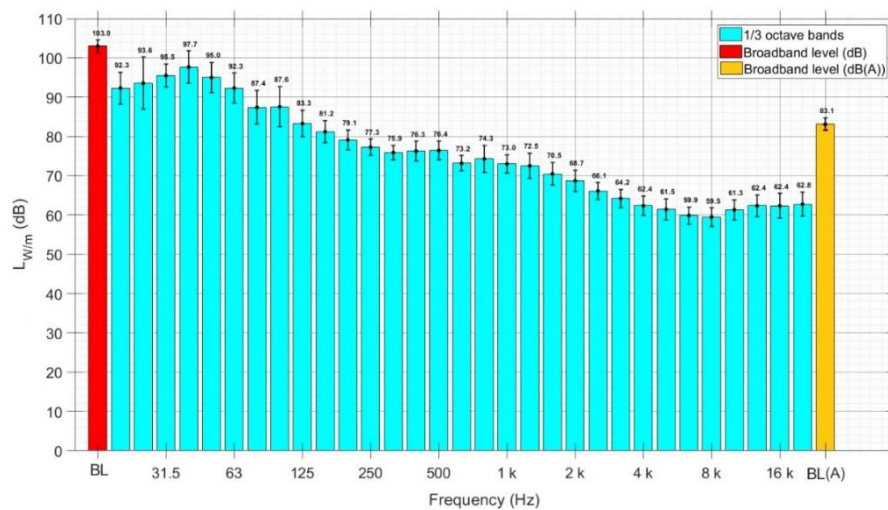


Figure 15 - Niveaux actualisés de $L_{w/m}$ et incertitude associée, large bande et spectre.

Enfin, une analyse a été menée sur l'effet de la variabilité des navires, donc des caractéristiques intrinsèques qui influencent l'émission sonore. Les distributions SEL de chaque navire sont illustrées à la Figure 7.

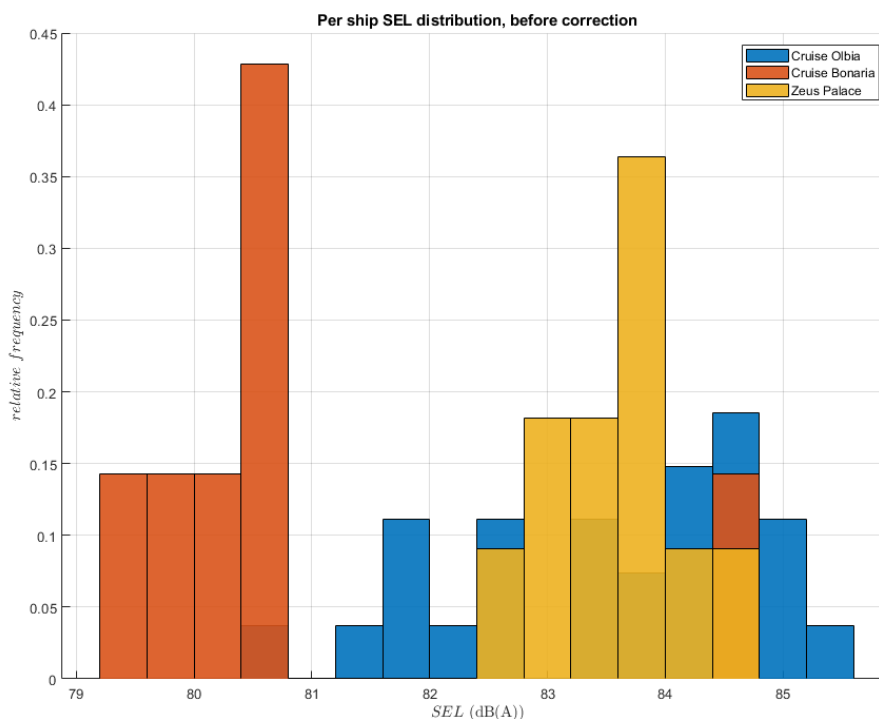


Figure 16 - Distributions des SEL des navires, valeurs de pré-correction.

Les valeurs plus faibles liées aux passages du navire Cruise Bonaria sont cependant dues à une plus grande distance des passages par rapport aux deux autres ferries, comme on peut facilement l'observer à partir des distributions de distances illustrées à la Figure 8.

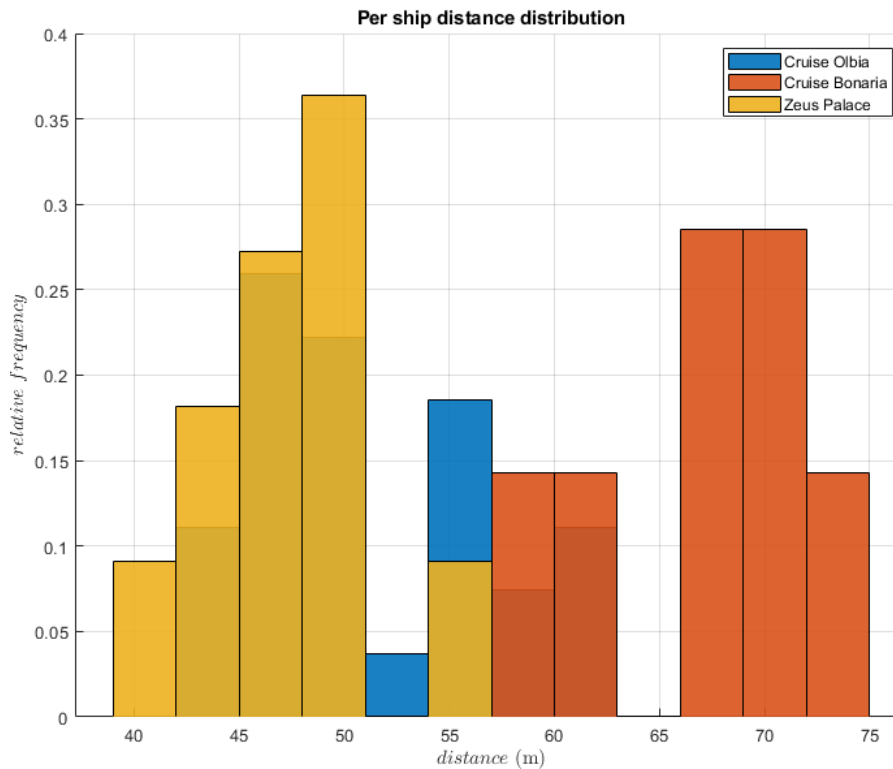


Figure 17 - Distributions des distances minimales par rapport au microphone des navires.

La Figure 9 montre clairement l'effet de la correction en fonction de la distance appliquée sur le SEL des passages des trois navires.

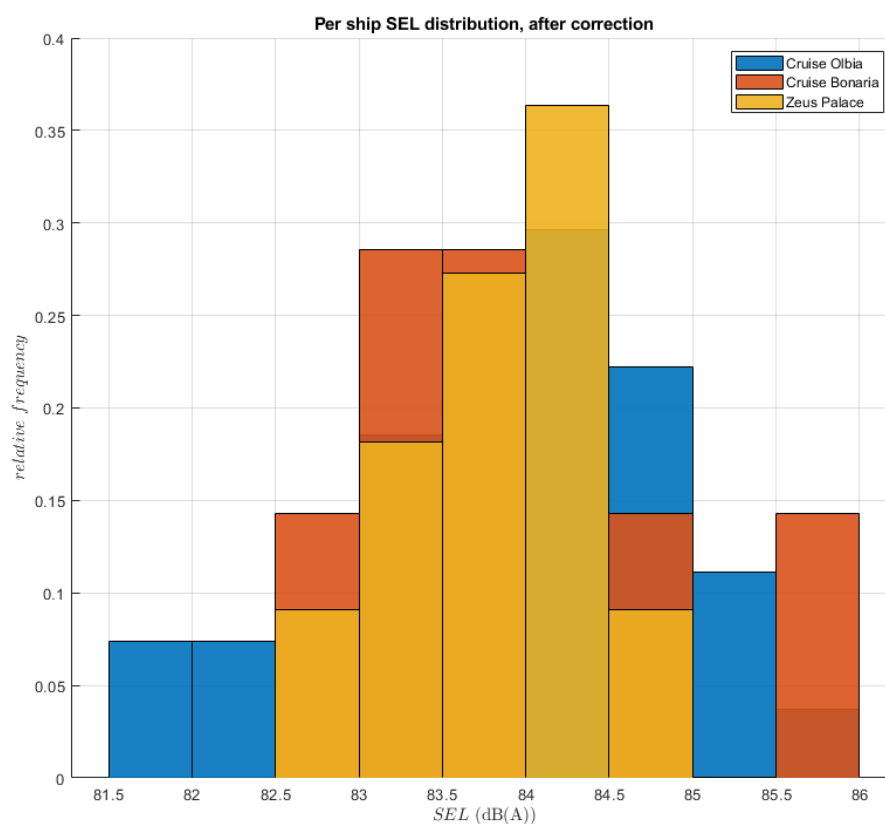


Figure 18 - Distributions des SEL des navires, valeurs après correction.

Dans le Tableau 1, les améliorations obtenues peuvent être vues quantitativement. L'écart type (std) après correction est réduit grâce à deux facteurs: la réduction de la variabilité des navires individuels et des valeurs moyennes les plus proches les unes des autres, effet de la correction de distance.

Des améliorations similaires ont également été trouvées aux niveaux de puissance acoustique estimés; les valeurs numériques sont indiquées dans le Tableau 2.

Tableau 1 - Écart moyen et standard (std) des SEL avant et après correction.

SEL Avant correction				
	Cruise Olbia	Cruise Bonaria	Zeus Palace	Tutti i traghetti
	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))
Écart moyen	83.5	80.8	83.6	83.1
std	1.3	1.7	0.6	1.6
SEL Après correction				
	Cruise Olbia	Cruise Bonaria	Zeus Palace	Tutti i traghetti
	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))	(dB(A))
Écart moyen	83.9	83.9	83.6	83.9
std	1.0	1.1	0.6	0.9

Tableau 2- Écart moyen et standard (std) des Niveaux $L_{w/m}$ avant et après correction.

$L_{w/m}$ Ferries		
	Ferries Avant	Ferries Après
	(dB(A))	(dB(A))
Écart moyen	82.7	83.1
std	2.0	1.5

4. Discussions e conclusions

Les navires en mouvement comme source de bruit n'ont été étudiés que ces dernières années, au cours desquelles une plus grande attention a été accordée au bruit des ports. En effet, les zones résidentielles proches des ports peuvent être soumises à des nuisances sonores d'origine portuaire. Pour évaluer correctement l'exposition des citoyens au bruit, une cartographie acoustique détaillée est nécessaire avec une description précise des données d'entrée dans le modèle de calcul. À cet égard, dans un travail antérieur [40], les puissances sonores, en bande large et en bandes de troisième octave, de certaines catégories de navires ont été fournies.

Ce travail a débuté par la création d'une base de données dérivée de mesures en continu, qui ont duré quelques mois et effectuées au canal d'accès du port industriel de Livourne, à partir d'enregistrements de vidéosurveillance et de données de trafic maritime fournies par l'Autorité portuaire de Livourne. Les images de vidéosurveillance ont été utilisées pour calculer la vitesse de transit des navires et estimer la distance minimale de la position du microphone de ceux-ci. Les valeurs de L_{Aeq} , SEL, le spectre mesuré et le tirant d'eau de chaque transit ont été utilisés pour compléter la base de données.

Bien que généralement des passages uniques d'un même navire produisent des niveaux de bruit comparables, cette étude visait à minimiser l'incertitude associée à l'émission sonore de la catégorie des traversiers et à étudier les effets du tirant d'eau et de la vitesse, en tenant compte de la distance de la source du microphone. Une régression multilinéaire a été appliquée aux données de trois ferries différents afin d'évaluer la corrélation avec les paramètres considérés.

Le premier résultat significatif est que le tirant d'eau des navires n'est pas un paramètre pertinent dans le bruit produit. Ce résultat a été vérifié pour des valeurs de tirant d'eau comprises entre 6,2 m et 7,2 m, pour la catégorie de ferries analysée et aux vitesses de transit dans le port. Le tirant d'eau pourrait être important pour les plus gros navires, tels que les porte-conteneurs, sur lesquels une future étude est prévue qui réévaluera les effets du tirant d'eau sur le bruit produit.

D'autre part, la vitesse est un paramètre qui affecte le niveau d'émission sonore de la source navale. La distance est un paramètre qui n'affecte pas directement la puissance acoustique mais qui est très important dans la propagation et l'atténuation, essentiel pour évaluer les niveaux de bruit à n'importe quel récepteur. Pour cette raison, grâce à la régression multiple réalisée, il a été possible de corriger les niveaux de bruit mesurés en obtenant une estimation du niveau de puissance acoustique.

En utilisant les données corrigées de la distance et en excluant le tirant d'eau, il a été possible d'observer la dépendance du bruit produit par les navires en fonction de la vitesse de transit. Cette dépendance n'a été vérifiée que dans la plage de vitesse étudiée, avec des valeurs

comprises entre 4,8 et 9,3 nœuds ($2,5 \div 4,8$ m / s), ce qui représente pourtant bien ce qui a été vérifié dans la zone portuaire. Des études complémentaires seraient sûrement nécessaires pour les mouvements en haute mer, bien que leur intérêt serait moindre dans le cadre de l'évaluation du bruit qui affecte les centres habités car ils seraient situés à de grandes distances. De plus, la dépendance à la vitesse pourrait également masquer la dépendance à d'autres paramètres non pris en compte, de sorte qu'une étude spécifique et plus approfondie serait certainement nécessaire.

Les résultats obtenus concernant l'effet de la vitesse de transit peuvent être importants dans la phase de planification et de gestion de la zone portuaire, tout en étant très utiles aux fins de la cartographie acoustique. En effet, la présente étude montre comment la connaissance des vitesses moyennes de transit peut conduire à une modélisation plus précise. Il est également montré que le manque d'informations sur la vitesse peut entraîner une erreur maximale de 1 dB (A), en utilisant la valeur moyenne de ce travail comme référence. Un développement futur de ce travail impliquera des bateaux plus petits, qui couvrent généralement une gamme de vitesses plus large. Ce type de bateau est en effet négligé mais sa contribution au niveau sonore global peut être importante dans les marinas.

Grâce à la correction de distance, il a été possible d'obtenir une meilleure estimation de la puissance acoustique des ferries par rapport aux travaux précédents [40], passant de $83,1 \pm 1,5$ dB (A) à $82,7 \pm 2,0$ dB (A). De plus, le positionnement correct de la source sonore dans le modèle est un facteur important dans l'évaluation des niveaux de bruit à distance. Le manque d'information sur la hauteur de la source, dont la contribution est estimée en une erreur sur la distance maximale de 3 m, fait partie de l'incertitude estimée et n'a pas été décisive dans l'estimation de la puissance acoustique dans ce travail. Cependant, connaître la hauteur correcte de la source pourrait être important dans les modèles de propagation à longue distance, en particulier en raison de tout obstacle solide particulièrement élevé.

Les bandes de fréquences entre 500 Hz et 2,5 kHz ont montré une plus grande corrélation avec la vitesse de transit des navires, tandis que les autres n'étaient pas pertinentes. En effet, à partir de sources telles que les systèmes de refroidissement et de ventilation, qui pourraient être importants aux hautes fréquences ($> 2,5$ kHz) ou de tout bruit structurel de la coque, pouvant induire des bruits à basse fréquence (< 500 Hz), non dépendance à la vitesse.

Ce travail est un point de départ pour de futurs développements, prenant notamment en considération d'autres techniques comme, par exemple, l'utilisation d'une caméra acoustique utilisant la méthode de formation de faisceaux (*beam forming*) et qui, associant son utilisation à des mesures de bruit traditionnelles en classe I, il pourrait s'avérer très utile pour identifier, localiser et caractériser plus en détail les sources sonores d'un navire.

Bibliographie

1. Naletina, D.; Perkov, E. The economic importance of maritime shipping with special reference on Croatia. Economic and Social Development. In Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Economic and Social Development, Melbourne, Australia, 9–10 February 2017; p. 248.
2. United Nations. *Review of Maritime Transport-2019*; United Nations Conf. Trade Develop: New York, USA, 2019.
3. Murphy, E.; King, E.A. An assessment of residential exposure to environmental noise at a shipping port. *Environ. Int.* **2014**, *63*, 207–215, doi:10.1016/j.envint.2013.11.001.
4. Paschalidou, A.K.; Kassomenos, P.; Chonianaki, F. Strategic Noise Maps and Action Plans for the reduction of population exposure in a Mediterranean port city. *Sci. Total Environ.* **2019**, *654*, 144–153, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.048.
5. Licitra, G.; Bolognese, M.; Palazzuoli, D.; Fredianelli, L.; Fidecaro, F. Port noise impact and citizens' complaints evaluation in RUMBLE and MON ACUMEN INTERREG projects. In Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, Montreal, QC, Canada, 7–11 July 2019.
6. Guski, R.; Schreckenberg, D.; Schuemer, R. WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and annoyance. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2017**, *14*, 1539, doi:10.3390/ijerph14121539.
7. Beutel, M.E.; Brähler, E.; Ernst, M.; Klein, E.; Reiner, I.; Wiltink, J.; Hahad, O. Noise annoyance predicts symptoms of depression, anxiety and sleep disturbance 5 years later. Findings from the Gutenberg Health Study. *Eur. J. Public Health* **2020**, *30*, 516–521, doi:10.1093/eurpub/ckaa015.
8. Lechner, C.; Schnaiter, D.; Bose-O'Reilly, S. Combined Effects of Aircraft, Rail, and Road Traffic Noise on Total Noise Annoyance—A Cross-Sectional Study in Innsbruck. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 3504, doi:10.3390/ijerph16183504.
9. Licitra, G.; Fredianelli, L.; Petri, D.; Vigotti, M.A. Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Sci. Total Environ.* **2016**, *568*, 1315–1325, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.11.071.
10. Erickson, L.C.; Newman, R.S. Influences of background noise on infants and children. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* **2017**, *26*, 451–457, doi:10.1177/0963721417709087.
11. Minichilli, F.; Gorini, F.; Ascari, E.; Bianchi, F.; Coi, A.; Fredianelli, L.; Cori, L. Annoyance judgment and measurements of environmental noise: A focus on Italian secondary schools. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 208, doi:10.3390/ijerph15020208.
12. Steven, S.; Frenis, K.; Kroeller-Schoen, S.; Kalinovic, S.; Helmstaedter, J.; Kvandova, M.; Munzel, T.; Oelze, M.; Daiber, A. P4478 Noise pollution exacerbates the development of arterial hypertension via additive oxidative stress and impairment of NO signaling. *Eur. Heart J.* **2019**, *40*, 745–873, doi:10.1093/eurheartj/ehz745.0873.
13. van Kamp, I.; Simon, S.; Notley, H.; Baliatsas, C.; van Kempen, E. Evidence Relating to Environmental Noise Exposure and Annoyance, Sleep Disturbance, Cardio-Vascular and Metabolic Health Outcomes in the Context of IGCB (N): A Scoping Review of New Evidence. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 3016, doi:10.3390/ijerph17093016.
14. Recio, A.; Linares, C.; Banegas, J.R.; Díaz, J. Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. *Environ. Res.* **2016**, *146*, 359–370, doi:10.1016/j.envres.2015.12.036.
15. Directive, E.U. Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Off. J. Eur. Communities L* **2002**, *189*, 2002.
16. Oltean-Dumbrava, C.; Watts, G.; Miah, A. Towards a more sustainable surface transport infrastructure: A case study of applying multi criteria analysis techniques to assess the sustainability of transport noise reducing devices. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 2922–2934, doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.096.
17. Kaewunruen, S.; Martin, V. Life cycle assessment of railway ground-Borne noise and vibration mitigation methods using geosynthetics, metamaterials and ground improvement. *Sustainability* **2018**, *10*, 3753, doi:10.3390/su10103753.
18. Tian, Y.; Wan, L.; Ye, B.; Yin, R.; Xing, D. Optimization Method for Reducing the Air Pollutant Emission and Aviation Noise of Arrival in Terminal Area. *Sustainability* **2019**, *11*, 4715, doi:10.3390/su11174715.

19. Danihelová, A.; Němec, M.; Gergeľ, T.; Gejdoš, M.; Gordanová, J.; Ščensný, P. Usage of Recycled Technical Textiles as Thermal Insulation and an Acoustic Absorber. *Sustainability* **2019**, *11*, 2968, doi:10.3390/su11102968.
20. Praticò, F.G.; Fedele, R.; Vizzari, D. Significance and reliability of absorption spectra of quiet pavements. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *140*, 274–281, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.130.
21. Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental (*Automatic Tool for Environmental Diagnosis*), LIFE02 ENV/E/000274; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2005.
22. Eco.Port Project (cod. 41). EU Co-Financed Project through the European Regional Development Fund (ERDF) in the Framework of the Adriatic New Neighbourhood Program INTER-REG/CARDS-PHARE 2000–2006. Available online: <https://www.port.venice.it/it/progetto-eco-port.html> (accessed on 1 July 2020). (In Italian)
23. NoMEPorts 2008. *Noise Management in European Ports*, LIFE05 ENV/NL/000018, *Good Practice Guide on Port Area Noise Mapping and Management. Technical Annex*; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2008.
24. SIMPYC 2008. *Sistema de Integración Medioambiental de Puertos y Ciudades (Environmental integration for ports and cities)*, LIFE04 ENV/ES/000216; Environment-LIFE: Brussels, Belgium, 2008.
25. EcoPorts 2011. EcoPorts Project, Information Exchange and Impact Assessment for Enhanced Environmental-Conscious Operations in European Ports and Terminals, FP5. Available online: http://cordis.europa.eu/project/rcn/87079_en.html (accessed on 1 July 2020).
26. Schenone, C.; Pittaluga, I.; Borelli, D.; Kamali, W.; El Moghrabi, Y. The impact of environmental noise generated from ports: Outcome of MESP project. *Noise Mapp.* **2016**, *3*, doi:10.1515/noise-2016-0002.
27. Alsina-Pagès, R.M.; Socor, J.C.; Bergadà, P. The impact of man-made noise on the passenger transport stations of Port of Barcelona. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2019; Volume 259, No. 3, pp. 6912–6922.
28. Santander, A.; Aspuru, I.; Fernandez, P. OPS Master Plan for Spanish Ports Project. Study of potential acoustic benefits of on-Shore power supply at berth. In *Proceedings of the Euronoise 2018, Heraklion-Crete, Greece, 27–31 May 2018*.
29. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Acoustical impact of the ship source. In *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China, 13–17 July 2014*; pp. 13–17.
30. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Airborne noise emissions from ships: Experimental characterization of the source and propagation over land. *Appl. Acoust.* **2016**, *104*, 158–171, doi:10.1016/j.apacoust.2015.11.005.
31. Badino, A.; Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Noise emitted from ships: Impact inside and outside the vessels. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2012**, *48*, 868–879, doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.1064.
32. Witte, J. Noise from moored ships. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2010; Volume 2010, pp. 3202–3211.
33. Di Bella, A.; Tombolato, A.; Cordeddu, S.; Zanolto, E.; Barbieri, M. In situ characterization and noise mapping of ships moored in the Port of Venice. *J. Acoust. Soc. Am.* **2008**, *123*, 3262, doi:10.1121/1.2933567.
34. Neptunes Project. Available online: <https://www.neptunes.pro/> (accessed on 1 July 2020).
35. Schenone, C.; Borelli, D.; Pallavidino, E.; Yousseu, A.; Gaggero, T.; Waffo, E. The Port Noise Analysis and Control in Interreg Italy-France Maritime Programme. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*; Institute of Noise Control Engineering: Reston, VA, USA, 2019; Volume 259, No. 4, pp. 5781–5792.
36. Bolognese, M.; Fidecaro, F.; Palazzuoli, D.; Licitra, G. Port noise and complaints in the north tyrrhenian sea and framework for remediation. *Environment* **2020**, *7*, 17, doi:10.3390/environments7020017.
37. Bernardini, M.; Fredianelli, L.; Fidecaro, F.; Gagliardi, P.; Nastasi, M.; Licitra, G. Noise Assessment of Small Vessels for Action Planning in Canal Cities. *Environments* **2019**, *6*, 31, doi:10.3390/environments6030031.
38. Di Bella, A.; Fausti, P.; Francesca, R.; Tombolato, A. Measurement methods for the assessment of noise impact of large vessels. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration, Athens, Greece, 10–14 July 2016*; pp. 1–7.
39. Fausti, P.; Santoni, A.; Martello, N.Z.; Guerra, M.C.; Di Bella, A. Evaluation of airborne noise due to navigation and manoeuvring of large vessels. In *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, London, UK, 23–27 July 2017*.

40. Fredianelli, L.; Nastasi, M.; Bernardini, M.; Fidecaro, F.; Licitra, G. Pass-by characterization of noise emitted by different categories of seagoing ships in ports. *Sustainability* **2020**, *12*, 1740, doi:10.3390/su12051740.
41. IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics-Sound Level Meters-Specifications*; IEC: Geneva, Switzerland, 2013.
42. Borelli, D.; Gaggero, T.; Rizzuto, E.; Schenone, C. Holistic control of ship noise emissions. *Noise Mapp.* **2016**, *3*, 107–119, doi:10.1515/noise-2016-0008.
43. ISO/CD 11819-1 *Acoustics-Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise-Part 1: Statistical Pass-By method*; ISO: Geneva, Switzerland, 1997.
44. Licitra, G.; Cerchiai, M.; Teti, L.; Ascari, E.; Bianco, F.; Chetoni, M. Performance assessment of low-noise road surfaces in the Leopoldo project: Comparison and validation of different measurement methods. *Coatings* **2015**, *5*, 3–25, doi:10.3390/coatings5010003.



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA**



La cooperazione al cuore del Mediterraneo La coopération au coeur de la méditerranée