

PROJET REPORT

"Bruit et Ports"

CUP

Produit T4.2.1

[T4.2.1 Document "Méthodologie transfrontalière de réduction et de contrôle du bruit portuaire"]

Composant [T4 Mise en place et rédaction de méthodes d'évaluation et de contrôle du bruit portuaire]

Activités [T4.2: Rédaction d'une méthodologie transfrontalière efficace visant à réduire et maîtriser le bruit portuaire]

Organisation responsable de la composante: [UNICA-DICAAR]

Niveau de diffusion		
PU	Publique	
CO	Confidentiel, réservé aux partenaires	

Nombre de documents à livrer:	[T4.2.1]
Responsable de la documentation à livrer:	[Prof. Paolo Fadda]
Composant:	[T4]

Auteur(s) – par ordre alphabétique		
Prénom	Organisation	E-mail
Paolo Fadda	UNIV Cagliari	fadda@unica.it
Federico Sollai	UNIV Cagliari	fsollai@unica.it

--	--	--

Révision du document			
Version	Date	Changements	
		Type de changements	Modifié par

Résumé

INDICE

INDICE	3
PRÉMISSSE	5
SECTION I. L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DU BRUIT DES PORTS ...	5
1. INTRODUCTION	5
2. MODELISER LE BRUIT DES ACTIVITES PORTUAIRES.....	6
3. MODELISER LE BRUIT DES NAVIRES.....	8
4. CARACTERISER L'EXPOSITION AU BRUIT DES PORTS	12
4.1 METHODE 1 : modélisation horaire du trafic portuaire.....	13
4.2 METHODE 1-bis : évaluation de la puissance acoustique équivalente.....	15
4.3 METHODE 2 : prise en compte des mouvements sur la base annuelle.....	16
4.4 Méthode 2-bis : évaluation de la puissance acoustique équivalente en moyenne annuelle	18
4.5 Cas particuliers	20
5. ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE DU MODÈLE	20
5.1 IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	21
6. ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE.....	27
7. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES DIRECTIVES LE PROJET DECIBEL.....	31
7.1 Vade-mecum des méthodes de surveillance,	31
7.2 Type de mesures de réduction du bruit.....	32
7.3 Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision.	34
SECTION II. ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DANS DES CONDITIONS DE TRAFIC VARIÉES PAR DES INTERVENTIONS DE GESTION ET DE RÉGULATION.....	42
1. INTRODUCTION	42
2. ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES FLUX DE TRAFIC ET DES ÉMISSIONS SONORES (RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.2.1)	43
2.1 ANALYSE ACOUSTIQUE ENVIRONNEMENTALE	43
2.2 ENQUÊTES SUR LE BRUIT ET LA CIRCULATION.....	44
3. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU BRUIT DU TRAFIC (RÉSUMÉ DU RÉSULTAT T2.2.2).....	49
3.1 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL DE PRÉVISION DES ÉMISSIONS SONORES	49
3.2 LA CONSTRUCTION DU MODÈLE DE TRAFIC AVEC LE LOGICIEL SUMO	54

3.3	CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS DE RÉORGANISATION DE LA CIRCULATION AVEC DES SYSTÈMES D'INFO-MOBILITÉ	64
3.4	L'APPLICATION DU MODÈLE PRÉDICTIF AVEC LES RÉSEAUX NEURONAUX AUX DONNÉES DE SIMULATION DE TRAFIC AVEC LE LOGICIEL SUMO	69
4.	RÉSUMÉ DE LA VALIDATION DU MODÈLE	75
5.	L'IDENTIFICATION DE L'IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	80
5.1	Vade-mecum de la méthodologie de surveillance.....	83
5.2	Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision.	87
6.	ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE	90
SECTION III. ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DES ACTIVITÉS PORTUAIRES DE MANUTENTION DES MARCHANDISES ET DES PERSONNES DANS L'HYPOTHÈSE DES NOUVEAUX TRANSPORTEURS DE PROPULSION D'ÉNERGIE		
1.	INTRODUCTION	94
2.	RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.3.1.....	95
2.1	Mesures acoustiques in situ	96
2.2	Matériel utilisé et opérateurs	96
2.3	Matériel acquis et post-traitement.....	99
2.4	Modèles d'émission sonore des nouveaux systèmes de propulsion.....	102
2.5	Estimations de la réduction des émissions sonores dues aux activités portuaires dans des scénarios avec différents degrés de pénétration des nouveaux dispositifs.....	103
3.	ÉLÉMENTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES LIGNES DIRECTRICES	107
3.1	Vademecum / méthodologies d'application des méthodes de prévision.	107
SECTION IV. ÉVALUATION DES COÛTS SOCIAUX ASSOCIÉS À LA POLLUTION SONORE DANS LES PORTS		
1.	INTRODUCTION	109
2.	SOMMAIRE DU PRODUIT T2.4.1.....	109
3.	SOMMAIRE DU PRODUIT T2.4.2.....	112
4.	ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE	113
5.	ÉLÉMENTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES LIGNES DIRECTRICES	116
Index des Figures		117
Index des Tableaux		119

PRÉMISSSE

Ce rapport résume les études des modèles développés dans le projet Report, et décrit les validations des modèles utilisés et indique les éléments de synthèse et les méthodologies à suivre pour l'application des modèles développés dans d'autres réalités similaires à celles examinées. Le document vise à fournir une contribution scientifique à l'élaboration de lignes directrices et d'approches méthodologiques pour aborder la question de la réduction du bruit généré par les activités portuaires commerciales, qu'il s'agisse d'activités logistiques au sein des ports eux-mêmes ou du trafic généré et attiré par les ports eux-mêmes.

SECTION I. L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DU BRUIT DES PORTS

Les ports méditerranéens sont entourés de zones urbaines densément peuplées où le bruit généré par les sources sonores de leur activité a un impact très important. L'objectif à long terme du projet REPORT est la réduction des émissions sonores des ports de l'espace de coopération transfrontalier dans le but de rendre plus durables les installations portuaires de l'Espace Maritime. Ceci est effectué par le développement d'une approche dédiée de la gestion du bruit des ports. La mise en œuvre d'une telle approche se base d'une part sur des protocoles de mesurage spécifiques et d'autre part sur des méthodes et outils logiciels prévisionnels appropriés.

1. INTRODUCTION

A titre d'introduction, notons toutefois que le bruit du port, ça n'existe pas, ou du moins, ne représente pas un problème en soi. Tout au plus pourrait-on parler du bruit des vagues se brisant sur les digues ou le bruit du vent dans les haubans. Et qui aurait l'idée de classer ces sons comme source de gêne sonore (en considérant que "noise is unwanted sound"). Toutefois, les ports sont le théâtre d'un grand nombre d'activités liées directement ou indirectement au transport maritime. Ainsi, le véritable objet du travail des ingénieurs acousticiens consiste à caractériser, maîtriser, réduire la gêne sonore produite par les activités portuaires pour les populations riveraines des ports. La protection des travailleurs portuaires contre les bruits excessifs sur leur poste de travail est un autre problème qui mérite que l'on s'y intéresse mais cela va au-delà des objectifs du présent projet.

Les activités portuaires pouvant être à l'origine de gêne sonore pour les riverains sont nombreuses et très variées. La fonction principale d'un port est de faciliter le changement de moyen de transport pour les personnes et les marchandises. En

particulier, le transbordement des marchandises, que ce soit sous forme de conteneurs ou de matières premières en vrac demande de la manutention et des installations qui produisent des bruits qui peuvent être perçus dans les zones habituées proches des ports. Pour les ports insulaires, le trafic des ferries est une activité essentielle à la vie économique et touristique de l'île. Souvent les quais d'accueil des ferries se trouvent très proches des centres de la ville et ce sont les entrées et sorties des véhicules qui causent le plus de désagrément pour les habitants proches ou pour ceux qui se promènent le long des quais.

De par sa fonction primaire, un port génère donc un important trafic, qu'il soit maritime, routier ou ferroviaire, lié à l'arrivée et au départ des personnes et des marchandises. De ce fait, l'activité portuaires risque de générer une gêne sonore bien au-delà de son emprise. L'importance d'un port se mesure à l'importance de l'arrière-pays qu'il dessert. La zone portuaire est le lieu où converge le trafic routier et ferroviaire venant ou en partance pour l'arrière-pays et cette concentration se traduit par une augmentation de la gêne sonore. En particulier, lorsque le port est situé à proximité du centre-ville, le trafic routier induit par les ferries se superpose au trafic local et, à certaines heures de la journée, cause une saturation des voies étroites avec des effets négatifs sur la qualité de l'air et sur l'environnement sonore.

Souvent, le transbordement des marchandises s'accompagne d'une transformation sur place des matières premières arrivées par bateau avant leur distribution vers l'arrière-pays. La plupart des grands ports commerciaux intègrent ainsi d'importantes installations industrielles, notamment pétrochimiques, fonctionnant 7 jours sur 7, 24 heures sur 24. De telles installations industrielles génèrent du bruit qui se propage sans trop d'encombre aux zones d'habitations proches.

La plupart de ces aspects ont été décrit et étudié dans de nombreux projets nationaux et européens, comme par exemple les projets NMPB et HARMONOISE pour le bruit routier et ferroviaire, IMAGINE pour ce qui concerne le bruit industriel et NoMEPorts pour les (très) grands ports. Pour cette raison, et eu égard aux contraintes en temps et en budget, les efforts fournis dans le projet REPORT se sont concentrés sur un des aspects les moins bien connus du bruit des ports, c'est-à-dire les navires eux-mêmes. Les navires en tant que source de bruit et de gêne sonore méritent un intérêt particulier pour la modélisation des ports de la Méditerranée étant donné que très souvent ces ports se trouvent proches des zones habitées, voire intégrées dans le centre-ville.

2. MODELISER LE BRUIT DES ACTIVITES PORTUAIRES

L'activité T2.1 du projet REPORT, réalisé conjointement par UNIGE et le CSTB vise spécifiquement à définir (tâche T2.1.1) et à implémenter (tâche T2.1.2) un modèle de simulation acoustique spécifique aux zones portuaires, en mettant en avant la modélisation des objets et sources de bruit particulières que l'on peut trouver dans les ports.

La sous-tâche T2.1.1 avait pour objectif d'identifier les adaptations nécessaires pour bien prendre en compte les spécificités des zones portuaires dans le cadre d'une analyse à l'échelle urbaine du bruit, que ce soit dans le cadre de l'établissement d'une cartographie d'exposition des populations à proximité des zones portuaires, d'une étude d'impact lors d'une modification ou d'un nouveau projet, ou encore de l'évaluation de l'effet d'une solution de limitation du bruit. Ces modifications ont vocation à être implémentées au sein d'un outil existant, le logiciel MithraSIG v5, codéveloppé par le CSTB et l'entreprise Geomod, dédié aux études d'impact acoustiques en extérieur et aux cartes de bruit stratégiques.

Le travail conjoint du CSTB et d'UNIGE a permis, d'une part, de mettre en évidence les fonctionnalités existantes dans le logiciel MithraSIG applicables au cas du bruit portuaire, comme par exemple la base de données des sources industrielles issue du projet Européen IMAGINE et, d'autre part, d'identifier les principaux éléments dont l'utilisateur aurait besoin afin de modéliser plus précisément les différentes activités portuaires.

De cette analyse, il a été conclu que l'effort devrait se concentrer en premier lieu sur la modélisation géométrique et acoustique des navires. Eu égard à leur taille, les bateaux ne peuvent être assimilés à une source ponctuelle fictive, comme c'est le cas par exemple pour les véhicules routiers ou les avions, et une modélisation géométrique plus détaillée est nécessaire afin de bien prendre en compte les effets de réflexion et de diffraction sur la propagation du bruit.

Cette géométrie sert alors à positionner des sources acoustiques équivalentes aux différents équipements générateurs de bruit, comme les moteurs, les orifices de ventilation, les cheminées, les groupes auxiliaires et les autres équipements techniques. Chaque source élémentaire doit être caractérisée expérimentalement à partir de mesures in situ. Vue la grande diversité des navires que l'on rencontre dans les ports, il semble difficile de proposer des valeurs génériques représentatives pour certaines catégories de navires, comme cela est possible pour le trafic routier. La méthode de caractérisation proposée est celle développée par le CSTB dans le cadre du projet conjoint DECIBEL.

Il a été mis en avant que le niveau sonore produit par les différentes sources peut varier dans le temps en fonction des différents modes de fonctionnement, comme par exemple l'entrée dans le port, la mise à quai, le déchargement, le chargement... Il doit être possible de modéliser cette modulation dans le temps, d'une part, pour des raisons de validation et de comparaison à des mesures, et d'autre part, afin de pondérer la contribution de chaque mode de fonctionnement au niveau sonore équivalent, moyenné sur des périodes plus longues.

Le groupe de travail a retenu qu'au vu de la durée de chaque phase, il convenait dans un premier temps de concentrer les efforts sur la phase de chargement et de déchargement, donc lorsque le navire est à quai.

D'autre part, il a été mis en avant que les conditions météorologiques au bord de la mer peuvent être significativement différentes de ce que l'on rencontre sur la terre ferme. En particulier, le régime des vents varie significativement entre le jour (vent de terre) et la nuit (vent de mer) et peut représenter des variations significatives selon la saison (Libeccio ou Sirocco). Ces phénomènes influencent significativement la propagation du bruit à moyenne et grande distance. Une méthode d'analyse fine des phénomènes météorologique a été proposée et testée dans le cadre du projet DECIBEL et il est désormais possible de les exploiter dans le logiciel MithraSIG.

3. MODELISER LE BRUIT DES NAVIRES

Toutes les méthodes de prévision développées ces dernières années reposent sur le principe physique d'une séparation stricte entre la description des sources et la modélisation des phénomènes de propagation. Ceci contraste avec les approches plus anciennes qui fournissaient souvent des algorithmes spécifiques pour chaque type de source. Dans ces méthodes, la source était souvent caractérisée par une grandeur particulière difficile à appréhender, comme le niveau d'émission « E » ou le niveau sonore au point de référence « $L_{p,ref}$ ».

La modélisation de la propagation est indépendante de la source considérée et peut ainsi être réutilisée pour tout type de source de bruit. De plus, la propagation du son étant un phénomène physique bien connu, il est possible d'interchanger les méthodes de calcul sans pour autant changer la modélisation des sources. C'est dans cette optique, par exemple, que MithraSIG permet de combiner n'importe quel modèle de source avec n'importe quel modèle de propagation. D'autre part, la séparation stricte simplifie grandement la comparaison des méthodes analytiques ou heuristiques avec des calculs numériques, ce qui facilite la validation des méthodes rapides dans un grand nombre de configurations et de conditions comparée à la seule validation par la mesure. Dans la réalité, les mécanismes générateurs de bruit peuvent être très variés et complexes. Leur modélisation fine a souvent recours à des méthodes numériques avancées. Leur application est alors limitée à l'objet source, sans tenir compte de l'environnement complexe dans lequel il se trouve. Les méthodes prévisionnelles en acoustique environnementale visent précisément cette intégration des sources de bruit dans des environnements réels. Afin d'être en mesure de coupler les sources de bruit avec les modèles de propagation, il est nécessaire de construire un modèle simplifié de la réalité. Ainsi, la modélisation consiste à associer chaque source de bruit réelle à un ensemble de sources fictives (ou sources équivalentes) dont le rayonnement en champ lointain n'est qu'une représentation de la réalité complexe. Dans la pratique, une source équivalente peut être ponctuelle, linéique, surfacique ou volumique. Une telle modélisation implique donc de déterminer, pour chaque source équivalente, son type et sa position, puis de lui attribuer un spectre de puissance et un diagramme de rayonnement (ou directivité).

Pour que le modèle soit représentatif de la source réelle, il est nécessaire de déterminer le spectre de puissance de chaque source équivalente, soit à partir de modélisations numériques complexes, soit en effectuant une série de mesures. Les mesures et/ou calculs visant à caractériser les sources se font de préférence à courte distance de la source, dans des conditions contrôlées, dans des environnements particuliers, ceci afin de réduire au maximum des effets liés à la propagation. Lorsque les modèles sont paramétrés par des données non-acoustiques, celles-ci doivent être mesurées et consignées en parallèle des données acoustiques.

Le modèle ainsi construit peut alors être validé expérimentalement par comparaison avec les mesures initiales, puis avec des nouvelles mesures. Au besoin, il peut être nécessaire d'ajuster la modélisation initiale, de rajouter ou d'éliminer des sources équivalentes, de modifier leur nombre ou position. Lorsque les résultats sont probants, le modèle obtenu peut alors être utilisé, avec une certaine confiance, pour la prévision et la prédiction des niveaux sonores dans des situations et configurations différentes de celles utilisées lors de la mise au point des modèles. En particulier, le modèle ainsi construit permettra d'évaluer les niveaux d'exposition des personnes dans leurs lieux de vie, que ce soit à l'extérieur ou à l'intérieur des bâtiments.

Il convient de noter que l'évaluation de l'exposition au bruit peut être plus complexe que le simple fait de déterminer un niveau sonore du fait que les indicateurs utilisés pour caractériser les effets du bruit sur l'homme emploient des intégrations et/ou pondérations en temps et en fréquence. Il convient donc de ne pas confondre niveau sonore instantané, niveau sonore équivalent et indicateur d'exposition au bruit.

Si la phase d'exploitation des modèles prévisionnels est bien documentée (souvent dans des normes ou documents législatifs), il en va tout autrement de la phase de construction du modèle, et en particulier, lorsqu'il s'agit d'effectuer des mesures en vue de la calibration des sources équivalentes. Ce problème est particulièrement important pour les sources de bruit dont le niveau sonore varie significativement dans le temps. Pour résumer, la méthodologie générale de modélisation du bruit environnemental par une nouvelle classe de sources comporte les étapes suivantes :

- 1) Mener une analyse préliminaire de la source, identification des mécanismes de génération, importance et variabilité du bruit généré en fonction des conditions opérationnelles.
- 2) Modéliser la source réelle sous forme d'un ensemble de sources équivalentes. Dans le cas des navires, ces sources sont fortement liées à la géométrie de ceux-ci et il est nécessaire de créer préalablement un modèle géométrique représentatif. Cette géométrie devient alors le support pour placer les sources principales (cheminée, ventilation, machineries principale et auxiliaire, engins de manutention...) qui peuvent être assimilées à des points, des lignes ou des surfaces rayonnantes. Une telle modélisation demande, d'une

part, une bonne connaissance de la construction et du fonctionnement des navires et d'autre part, une expertise certaine quant aux mécanismes acoustiques de génération et de rayonnement du bruit.

- 3) Déterminer expérimentalement la puissance acoustique de chaque source équivalente, si nécessaire, pour les différentes phases de fonctionnement du navire : arrivée et mise à quai, déchargement, chargement, attente, départ...

Il convient de noter que la puissance acoustique L_w ne peut pas être mesurée directement et qu'il faut donc modéliser la relation entre celle-ci et les niveaux sonores mesurés L_p par un (ou plusieurs) microphones de référence placés à des endroits adéquats. On suppose donc connu la relation :

$$L_p = L_w - A$$

où l'atténuation A peut être évaluée en se basant sur les normes internationales telles que la série ISO 3741 – 3747, par l'emploi de modèles analytiques prenant en compte l'environnement réel du site de mesurage (voir par exemple les méthodes développées dans le projet DECIBEL et reprises dans l'annexe du rapport T2.1.2 du projet REPORT), ou encore par simulation logicielle en utilisant le modèle numérique construit préalablement (en posant initialement $L_w = 0$, la simulation donnera l'atténuation recherchée sous la forme $L_p = -A$).

Si besoin, on ajustera le modèle afin d'approximer au mieux les mesures, par exemple en ajoutant et/ou en déplaçant des sources créées lors de la construction du modèle initial.

- 4) Valider la modélisation des sources par comparaison avec des mesures similaires à celles utilisées pour calibrer le modèle. De préférence, une telle comparaison devrait couvrir la période complète de présence du navire dans le port et permettre de distinguer les différentes phases et modes de fonctionnement. Alors que les mesures initiales permettant de caractériser les puissances acoustiques peuvent être relativement courtes (de l'ordre de quelques minutes), une telle validation demandera des périodes de mesurage et/ou de monitoring plus longues. Afin de s'affranchir des problèmes de bruit de fond, les mesurages devraient être effectués de préférence à proximité des navires mais suffisamment éloignés afin de couvrir l'ensemble des sources du navire.
- 5) Exploiter le modèle afin de déterminer par le calcul les indicateurs d'exposition aux points d'intérêts (là où l'on cherche à caractériser les effets du bruit sur les personnes exposées), en prenant en compte le fonctionnement réel

de la source et les effets de propagation du bâti et des conditions météorologiques (et leur variabilité dans le temps).

- 6) Valider le modèle de prévisions par comparaison avec des mesurages long-terme. De préférence, la position de mesurage devrait être représentative de l'exposition des riverains, mais pas trop éloignée du port afin d'obtenir une émergence suffisante par rapport au bruit résiduel (et notamment le bruit du trafic routier non lié aux activités portuaires).
- 7) Proposer et tester des simplifications du modèle initial en fonction de l'application visée comme, par exemple, le regroupement de plusieurs sources en une seule ou la caractérisation de plusieurs phases de fonctionnement par une valeur unique de puissance acoustique moyennée dans le temps. De telles simplifications peuvent être aisément testées et validées par simulation numérique. En principe, ces simplifications peuvent engendrer une perte de précision pour les points de mesurage proche des navires ou une perte de détails dans l'évolution temporelle des niveaux sonores, alors que l'impact sur les indicateurs d'exposition (tel que le Lden ou le Ln) reste limité et compatible avec les exigences de la Directive Européenne.

Il convient de noter que la simplification des modèles a des limites. Par exemple, un ferry ou un cargo de plus de 100m de long ne pourra être assimilé à une source ponctuelle unique que pour des récepteurs éloignés d'au moins 200 ou 300 m...

Les principes de modélisation des navires ont été testés par le CSTB dans le cadre du projet DECIBEL. Il s'est avéré que la modélisation manuelle des navires était pertinente en termes de résultats acoustiques et réalisable avec les outils disponibles. Toutefois, la modélisation manuelle apparaît peu commode et gourmande en temps. L'objectif fixé pour la tâche T2.1.2 du projet REPORT a été d'automatiser cette modélisation et de simplifier la tâche au point de la rendre accessible à l'ensemble des utilisateurs. A notre connaissance, une telle fonctionnalité n'est disponible dans aucun autre logiciel de modélisation acoustique et/ou dans les outils de production des cartes d'exposition conformes aux exigences de la Directive Européenne.

L'intégration de cette nouvelle fonctionnalité dans MihraSIG a été réalisée par la société GEOMOD en tant que sous-traitant du CSTB. Une première version du nouveau logiciel a été livrée aux partenaires du projet en mai 2020. La version finale a été livrée fin 2020. Il est toutefois prévu que le logiciel continue à évoluer, notamment en prenant en compte les observations issues de la tâche T3.1 qui vise à valider les approches méthodologiques produites et leur implémentation sous forme de logiciel.

Le rapport T2.1.2 fournit tous les détails nécessaires à l'utilisation et l'exploitation de cette nouvelle fonctionnalité avec en particulier :

- Une présentation succincte des fonctionnalités du logiciel MithraSIG, y compris les principes de la modélisation et des calculs acoustiques.
- Les aspects méthodologiques de la modélisation acoustiques des principales sources de bruit liées aux activités portuaires.
- La mise à jour du manuel d'utilisation du logiciel MithraSIG, décrivant en détail le fonctionnement du nouveau module portuaire.

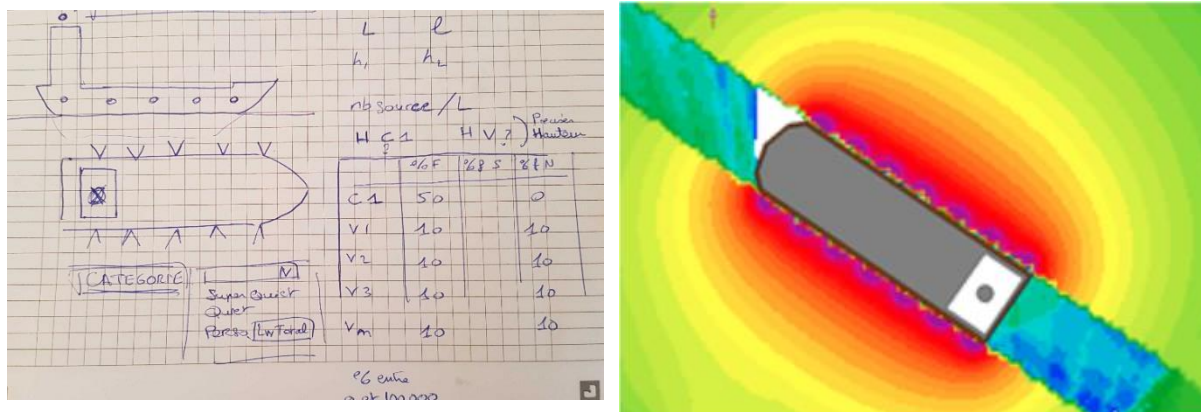


FIGURE I.1: DES PREMIERES IDEES PROPOSEES PAR LES EXPERTS (A GAUCHE), JUSQU'À LEUR MISE EN ŒUVRE LOGICIELLE (A DROITE)

4. CARACTERISER L'EXPOSITION AU BRUIT DES PORTS

Dans les tâches T2.1.1 et T2.1.2 du projet, une méthodologie a été proposée pour évaluer le bruit des ports dans des configurations spécifiques. Pour cela, une modélisation géométrique et acoustique des navires a été développée et implémentée dans le logiciel MithraSIG.

Une telle modélisation est bien adaptée pour évaluer la gêne sonore liée à une configuration particulière, par exemple lors de l'instruction de plaintes, occasionnelles ou récurrentes, de la part de riverains. Elle permet également d'étudier les meilleurs moyens de réduction du bruit à l'origine des plaintes. Lors du calcul d'une telle configuration, on peut supposer que la géométrie de celle-ci reste invariable dans le temps puisqu'on s'intéresse en premier lieu au bruit produit pendant la période durant laquelle un navire particulier se trouve à quai, et l'on modélise en détail les différentes phases de déchargement et de chargement. La prise en compte des horaires d'arrivée et départ des ferries permet d'apprécier plus finement la gêne sonore occasionnée en fonction de l'heure de la journée. Ainsi, un débarquement commençant avant 7 heures le matin ou un embarquement se terminant après 19h le soir sera source de plus de gêne que lorsque cette même activité a lieu en milieu de journée.

Toutefois, afin d'évaluer les effets du bruit sur la santé, la Directive Européenne préconise l'utilisation des indicateurs L_{den} (« level day evening night ») et L_n (« level night »), évalués en tant que valeurs moyennes sur une année représentative.

Il convient de remarquer que les activités portuaires sont, en ce sens, très différentes

des autres sources de bruit visées par l'application de la Directive. Le trafic routier, ferroviaire et aérien, ainsi que la plupart des installations industrielles se caractérisent par un bruit plus ou moins stable dans le temps à l'échelle des périodes « jour », « soirée » et « nuit », bien que des variations de l'ordre de 3 à 6 dB peuvent se produire pour cause de modulation du trafic avec les heures de la journée, le jour de la semaine ou encore les aléas des conditions météorologiques. De plus, la localisation de ces sources sonores ne varie peu ou pas du tout avec le temps. L'approche méthodologique compatible avec les exigences de la Directive consiste alors à considérer une journée représentative de 24 heures et utiliser comme données d'entrée les valeurs de débit et de vitesse en moyenne journalière. De la même façon, la propagation du son est modélisée en prenant des conditions météorologiques en moyenne annuelle, ou, dans le meilleur des cas, en moyenne saisonnière. Les niveaux sonores horaires sont ensuite combinés avec les pondérations adéquates afin d'obtenir une valeur L_{den} représentative pour l'année entière. De même, l'évaluation expérimentale des indicateurs long terme pour les sources de bruit visées par la Directive Européenne se basera en principe sur des mesures ponctuelles sur quelques heures ou quelques jours, avec éventuellement des corrections en fonction du trafic constaté pendant les mesures.

Dans les ports, la situation est toute autre. Les navires arrivent avec un certain rythme plus ou moins régulier, journalier (les ferries), mensuel, annuel... et restent à quai le temps nécessaire pour le transbordement des passagers et des marchandises (de quelques heures pour les ferries à plusieurs jours pour les cargos) avant de repartir pour des traversées plus ou moins longues.

Une approche pragmatique doit être recherchée afin de prendre en compte le fonctionnement réel des ports et de rendre compte de la variabilité temporelle des niveaux d'exposition dans le calcul de leur moyenne annuelle.

Il convient pour cela de distinguer deux modes de fonctionnement spécifiques : d'une part, le fonctionnement lié à un trafic journalier régulier comme celui induit par les ferries (avec un ou plusieurs passages par jour et une présence à quai de l'ordre de quelques heures) ; d'autre part, le fonctionnement des grands ports commerciaux recevant des navires long courrier (avec plusieurs passages par an et une présence à quai de plusieurs jours). Ces deux modes de fonctionnement doivent être simulés pour le calcul des moyennes annuelles des niveaux d'exposition.

Pour l'instant, la mise en œuvre de ces méthodologies demande un certain effort de modélisation de la part de l'utilisateur (averti). Une aide à la saisie et/ou une automatisation de la saisie peut être envisagée, après une certaine période d'expérimentation et de retour des premiers utilisateurs, nécessaire afin de valider la méthodologie proposée. Dans ce sens, la fonctionnalité portuaire dans MithraSIG peut continuer à évoluer après la fin du projet REPORT.

4.1 METHODE 1 : modélisation horaire du trafic portuaire

On considère ici le cas des ports insulaires dont le trafic principal se compose de ferries

qui font des traversées une ou deux fois par jour suivant des horaires fixes. Souvent ses ferries sont amarrés proche de la ville et leur géométrie influence significativement la propagation du son. En principe, l'affectation des navires à des places à quai est invariable.

La méthodologie recommandée est de simuler chaque bateau dans un calcul séparé (comme cela a été fait dans le projet DECIBEL pour le port de Bastia). On ignore le fait qu'il est possible (mais peu probable) que plus d'un navire soit présent dans le port en même temps.

Exemple :

Calcul	Configuration
1	Trafic terrestre résiduel, aucun bateau présent dans le port
2	Bateau A au quai 1 + trafic routier induit par les voitures entrant / sortant
3	Bateau B au quai 2 + trafic routier induit par les voitures entrant / sortant
4	Bateau C au quai 3 + trafic routier induit par les voitures entrant / sortant

TABLEAU 1 : EXEMPLE DE CONFIGURATION DES NAVIRES POUR LA METHODE 1

Afin d'être en mesure d'évaluer les niveaux d'exposition en moyenne sur une journée (et par extension sur une année), il est nécessaire de prendre en compte les heures de présence à quai. En mode « saisie horaire », il faut indiquer simplement la présence / absence du bateau sur le quai indiqué. Lorsque le bateau est absent, on met la puissance équivalente des sources à zéro, sinon, c'est la puissance nominale des sources en fonctionnement qui est utilisé pour les calculs.

Mode : saisie horaire																								
Période	NUIT								JOUR												SOIREE			
Heures	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Bateau 1, quai A	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		

TABLEAU 2 : METHODE 2 - CONFIGURATION DES SOURCES - MODE SAISIE HORAIRE

A partir de ces données, on peut calculer le niveau $L_{A,eq,T}$ par période horaire et à partir de ceux-ci les indicateurs Européens, L_{den} et L_n , en prenant en compte les pénalités pour les périodes de soirée ou de nuit.

A noter :

- Il est possible d'inclure le trafic routier engendré par le passage d'un bateau dans chaque calcul et ainsi d'évaluer plus spécifiquement l'émergence sonore correspondante, le trafic résiduel étant assimilé au bruit de fond hors activités portuaire.
- Pour plus de précision, on peut saisir une météo spécifique par heure. On pourrait automatiser la saisie si des données météo sont disponibles au format METAR (voir la procédure mise en place à cet effet pour le projet DECIBEL).

Pour le calcul des indicateurs L_{eq} ou L_{den} en tant que valeurs moyennes annuelles, on

suppose que chaque calcul correspond à une « journée représentative » de 24 heures. On obtient alors le résultat recherché par sommation des résultats partiels associés à chaque calcul :

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{L_{DEN,i}/10} \right]$$

où la somme porte sur l'ensemble des configurations calculées.

Utiliser une somme avec pondération peut être utile si l'on souhaite prendre en compte le fait que le trafic maritime est sujet à des fluctuations saisonnières et qu'une certaine liaison ne fonctionne que pendant une partie de l'année. Par exemple : si la ligne C fonctionne uniquement pendant la période estivale, soit 180 jours par an, la formule devient alors :

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N \frac{N_i}{365} 10^{L_{DEN,i}/10} \right]$$

où N_i est le nombre de jours de fonctionnement de la ligne i .

Si les horaires de passage et/ou les quais visités changent selon la saison, il peut être nécessaire de combiner cette méthode avec la méthode 1-bis présentée ci-dessous.

4.2 METHODE 1-bis : évaluation de la puissance acoustique équivalente

Alternativement, on peut préférer une « saisie par période », auquel cas il faudra saisir le nombre d'heures de présence, ou la fraction du temps du temps de présence, à quai, comme illustré ci-dessous.

Mode: saisie par période																								
Période	NUIT								JOUR										SOIREE					
Heures	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Bateau 1, quai A	1 / 8								4 / 12										2 / 4					

TABEAU 3 : METHODE 1-BIS - CONFIGURATION DES SOURCES - MODE SAISIE PAR PERIODE

Dans ce cas, la puissance acoustique équivalente par période de calcul est évaluée en prenant en compte la fraction du temps de fonctionnement effectif des sources suivant la formule :

$$L_{W,eq,p} = L_W + 10 \log \frac{N_i}{N_p}$$

avec N_i , le nombre d'heures de présence et N_p , la durée (en heures) de la période considérée.

Cette méthode, plus simple à mettre en œuvre, que la première a toutefois un inconvénient puisque les résultats sont exprimés directement en tant que moyenne sur la période et ne donnent pas accès aux niveaux sonores réels qui pourraient être mesurés lorsque le navire est présent dans le port. Par exemple : lorsqu'un certain navire est présent dans le port, on constate un niveau sonore L_p (ou $L_{eq,1h}$) de 52 dB(A) en façade des bâtiments les plus proches. Si ce bruit existe pendant 1 heure sur 8, on trouverait un résultat moyenné (sur la période de 8 heures) de 43 dB(A) et l'on pourrait

en tirer la conclusion erronée que le bruit de ce navire ne pose pas de problème particulier.

4.3 METHODE 2 : prise en compte des mouvements sur la base annuelle

Nous considérons maintenant le cas typique des cargos (gros ou petits) desservant le port plusieurs fois par an (une fois par semaine, une fois par mois...) et restant à quai pendant plusieurs jours afin de décharger et de charger des marchandises avant de repartir pour une nouvelle traversée. En principe, la configuration du port change en permanence, les navires rentrent et sortent, à des rythmes variables. Certains assurent des liaisons régulières, d'autres visitent le port en fonction de leur affrètement.

En théorie, on pourrait faire une simulation complète pour chaque jour de l'année, en prenant en compte la présence ou non de chaque navire sur tel ou tel quai d'amarrage, puis calculer la moyenne annuelle à partir de cette série temporelle, mais cela est totalement irréaliste, eu égard la quantité de données à saisir et le nombre de calculs à effectuer. D'autre part, le nombre de navires différents visitant le port est généralement trop important pour envisager un calcul séparé pour chacun (comme dans le cas de la Méthode 1 présentée ci-dessus).

Une solution pragmatique consiste alors à échantillonner l'année à partir d'un nombre limité de configurations typiques et représentatives. Dans chaque configuration plusieurs navires peuvent être à quai en même temps à divers endroits.

Par exemple :

Calcul	Configuration
1	Bateau A - quai 101, Bateau B - quai 203, Bateau C - quai 651
2	Bateau A - quai 103, Bateau D – quai 211, Bateau E – quai 502
3	Bateau X – quai 101, Bateau Y – quai 206, Bateau Z – quai 777
4	Etc...

TABLEAU 4 : EXEMPLE DE CONFIGURATION DES NAVIRES POUR LA METHODE 2

Pour le calcul, on suppose que, dans chaque configuration, les bateaux modélisés sont présents à quai 24 heures sur 24. Le bruit produit par chaque bateau peut éventuellement être modulé en fonction des horaires de travail, soit par tableau horaire (voir la Méthode 1 ci-dessus), soit par fraction de la durée des périodes (voir la Méthode 1-bis ci-dessus).

Mode : saisie horaire																								
Période	NUIT								JOUR										SOIREE					
Heures	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Source.1 (machinerie)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Source.2 (manutention)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

TABLEAU 5 : METHODE 2 - CONFIGURATION DES SOURCES - MODE SAISIE HORAIRE

Mode: saisie par période																								
Période	NUIT								JOUR												SOIREE			
Heures	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Source.1 (machinerie)	8 / 8								12 / 12												4 / 4			
Source.2 (manutention)	0 / 8								10 / 12												2 / 4			

TABLEAU 6 : METHODE 2 - CONFIGURATION DES SOURCES - MODE SAISIE PAR PERIODE

Lorsqu'une source est désactivée sur une certaine période, on met sa puissance acoustique équivalente à zéro en entrée du calcul, sinon on lui affecte sa puissance nominale. Si la saisie s'effectue en nombre d'heures de fonctionnement par période, on module la puissance acoustique équivalente sur la période en prenant en compte le temps de fonctionnement des sources.

$$L_{W,eq,p} = L_W + 10 \log \frac{N_i}{N_p}$$

avec N_i , le nombre d'heures de présence et N_p , la durée (en heures) de la période considérée.

Attention : dans la Méthode 1, l'indicateur horaire représentait la présence ou l'absence du navire à une position particulière. Dans les tableaux ci-dessus, la géométrie du navire et des sources associées reste invariable et l'indicateur est utilisé uniquement pour décrire le fonctionnement ou l'arrêt des sources.

On donne plus bas quelques conseils pour le choix des navires modélisés dans chaque configuration :

- Lorsque la présence et l'absence de deux navires sont corrélées positivement (les deux sont systématiquement présents en même temps), il convient de modéliser leur passage dans une même configuration, ainsi le calcul prendra en compte la présence de l'un sur la propagation du bruit du second. Ce cas est plutôt exceptionnel mais il peut arriver (par exemple dans le cas d'un transbordement d'un navire haute mer vers des péniches en vue d'une distribution des marchandises vers l'intérieur des terres).
- Lorsque la présence de deux navires n'est pas corrélée, on peut quand-même les modéliser dans une seule configuration à condition que la distance entre les deux soit suffisante pour que la présence de l'un ne modifie pas significativement la propagation du bruit occasionné par l'autre. On placera donc dans une seule configuration plusieurs navires de façon à minimiser les interactions acoustiques (réflexions, diffractions) entre deux navires proches. Autrement dit : on tentera de distribuer l'ensemble des navires dans les différentes configurations en prenant soin de maximiser la distance entre navires présents dans une même configuration.

Le calcul de l'indicateur global (en moyenne annuelle) se fait alors par post-traitement en prenant la **moyenne** des résultats partiels calculés pour chaque configuration :

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{DEN,i}/10} \right]$$

où la somme porte sur l'ensemble des N configurations calculées.

Attention : ici, il s'agit de calculer une moyenne alors que dans la Méthode 1, les différentes contributions sont simplement sommées.

Lorsque certaines configurations sont plus probables que d'autres, on peut calculer une moyenne pondérée en prenant en compte le nombre de jours qu'une certaine configuration arrive pendant une année représentative :

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\frac{1}{365} \sum_{i=1}^N N_i 10^{L_{DEN,i}/10} \right]$$

où N_i représente le nombre de jours d'activation de la configuration i .

A noter : la somme du nombre de jours pour chaque configuration ne doit pas nécessairement être égale à 365 jours... Avantage de la méthode : on peut rapidement évaluer l'impact d'un changement de fonctionnement du port, d'une augmentation et/ou diminution du trafic. Exemple : afin de simuler une augmentation de 20% du trafic de conteneurs, il suffit de multiplier le nombre de jours correspondant à cette configuration par 1.2 et de recalculer la moyenne.

A noter : si en sortie de calcul, les résultats sont stockés par groupe de sources et à condition que chaque groupe soit associé avec un bateau particulier, on peut moduler plus finement la présence de chaque bateau selon le nombre réel de jours de présence dans le port :

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\frac{1}{365} \sum_{i=1}^M N_i 10^{L_{DEN,i}/10} \right]$$

Où M représente le nombre total de navires modélisés (toute configuration confondu), $L_{DEN,i}$ le résultat partiel pour le groupe de sources associée à un navire et N_i le nombre de jours de présence dans le port du navire i .

4.4 Méthode 2-bis : évaluation de la puissance acoustique équivalente en moyenne annuelle

Si le nombre de jours de présence des différents navires est très fluctuant, il peut être plus intéressant de tenir compte du facteur temps en entrée de la simulation, plutôt que de l'appliquer en sortie du calcul. Le principe de la méthode est simple : au lieu de moyenner les niveaux d'exposition aux récepteurs, on évalue, en entrée de simulations, une puissance acoustique équivalente en moyenne annuelle.

Comme ci-dessus, il peut être nécessaire de créer plusieurs configurations afin de minimiser les interactions acoustiques (réflexions, diffractions) entre deux navires proches.

La saisie des données devient un peu plus complexe puisqu'il faut indiquer, en plus des horaires de fonctionnement, le nombre de jours de présence de chaque navire.

Calcul	Configuration (bateau/quai)	Nombre de jours/an
1	Bateau A - quai 101	42
	Bateau B - quai 203	33
	Bateau C - quai 651	25
2	Bateau A - quai 103,	12
	Bateau D – quai 211,	40
	Bateau E – quai 502	52
3	Bateau X – quai 101	15
	Bateau Y – quai 206,	17
	, Bateau Z – quai 777	23
4	Etc...	

TABLEAU 7 : EXEMPLE DE CONFIGURATION DES NAVIRES POUR LA METHODE 2-BIS

Dans ce cas, la puissance acoustique « équivalente » de chaque source doit être corrigée afin de tenir compte, à la fois des horaires de fonctionnement et du nombre de jours de présence

$$L_{W,eq,p} = L_W + 10 \log \frac{N_i}{N_p} + 10 \log \frac{N_j}{365}$$

Où N_i/N_p représente le nombre d'heures de fonctionnement (par période de la journée) et $N_j/365$ le nombre de jours de présence du navire dans le port.

Le résultat en sortie du calcul représentera immédiatement l'indicateur recherché en moyenne annuelle, pour l'ensemble des sources prises en compte dans la configuration. Afin de calculer l'indicateur global pour l'ensemble du port, il faut **sommer** les résultats partiels, comme dans la Méthode 1, sans autre forme de pondération.

Cette Méthode 2-bis semble plus simple à mettre en œuvre que la Méthode 2. Toutefois, elle souffre d'un inconvénient majeur : puisque les résultats sont exprimés directement dans l'indicateur global (donc avec prise en compte du temps de présence), l'utilisateur n'a plus accès aux niveaux sonores partiels que l'on pourrait observer (mesurer) lorsque le navire est présent dans le port.

Exemple : lorsqu'un certain navire est présent dans le port, on constate un niveau sonore L_p (ou $L_{eq,1h}$) de 55 dB(A) en façade des bâtiments les plus proches. Les activités de transbordement sont limitées à 8 h/jour, uniquement pendant la période de jour, et se déroulent sur 40 jours/an. Lors du calcul avec la Méthode 2-bis, on trouverait alors un résultat partiel $L_{den} = 44$ dB, correspondant à la contribution partielle de ce navire au niveau d'exposition L_{den} global. On pourrait en conclure un peu hâtivement que ce niveau est faible, du même ordre de grandeur du bruit de fond et donc ne devrait poser aucun problème pour le confort et la santé des riverains.

			NUIT								JOUR																	SOIREE				
Calcul	Configuration (bateau/quai)	Nombre de jours/an	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21						
1	Bateau A - quai 101	42																														
	Bateau B - quai 203	33																														
	Bateau C - quai 651	25																														
2	Bateau A - quai 103,	12																														
	Bateau D – quai 211,	40																														
	Bateau E – quai 502	52																														
3	Bateau X – quai 101	15																														
	Bateau Y – quai 206,	17																														
	Bateau Z – quai 777	23																														
4	Etc...																															

FIGURE I.2: EXEMPLE DE DONNEES D'ENTREE POUR LA METHODE 2-BIS

4.5 Cas particuliers

Les (très) grands ports avec une rotation importante, peuvent être simulés à partir d'une seule configuration représentative. Par exemple : un port est desservi par 250 porte-conteneurs par an, chaque bateau restant à quai pendant 4 jours en moyenne. Pendant une journée représentative, il y aura donc 3 bateaux amarrés simultanément. En choisissant judicieusement la taille et la position de ces trois navires on peut simuler une journée représentative en un seul calcul. La valeur en moyenne annuelle est alors égale à la valeur calculée sur une journée représentative. Comme-ci-dessus, on peut moduler le fonctionnement des sources afin de tenir compte des horaires de travail (ou laisser les sources actives 24 heures sur 24 si le port fonctionne en continue).

Certains ports insulaires connaissent d'importantes variations de trafic selon les saisons pour cause d'afflux de touristes en été. Il est alors probable que les compagnies maritimes augmentent le nombre de rotations et/ou le nombre de navires en service et que les autorités portuaires modifient le fonctionnement du port en affectant différemment les navires aux emplacements disponibles. Dans ce cas, il peut être intéressant de combiner les Méthodes 1 et 2 : on simule deux scénarios journaliers, l'un pour la période hivernale, l'autre pour la période estivale (en appliquant la Méthode 1), puis l'on combine les deux scénarios en prenant en compte la durée de chaque saison (en appliquant la Méthode 2 en prenant en compte le nombre de jours pour chaque période).

5. ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE DU MODÈLE

La validation du modèle de simulation synthétisé dans les sections précédentes est réalisée en suivant les étapes successives listées ci-dessous :

- Construction du modèle numérique
- Méthodologie de mesurage des puissances par source
- Reconstruction par simulation des mesures élémentaires
- Comparaison calcul/mesure sur un point de référence sur site sur 24h

- Comparaison calcul/mesure sur un point représentatif des habitats exposés sur 24h
- Comparaison calcul / monitoring Lden.

A noter : il n'existe pas de norme internationale couvrant le mesurage des indicateurs en moyenne annuelle. On peut se référer à la norme française NF S31-120 (décembre 2018).

5.1 IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

De par leur nature spécifique, la modélisation acoustique des activités portuaires n'est pas aussi simple que dans le cas des bruits produits par le trafic routier, ferroviaire ou aérien ou par des activités industrielles. Ces derniers sont en général relativement stables dans le temps et se prêtent plus aisément à des descriptions statistiques des sources de bruit alors que les activités portuaires sont très variées, fonctionnent chacune selon un schéma qui leur est propre, et ne représentent que rarement un caractère répétitif et prévisible.

Afin de bien modéliser les activités portuaires d'un point de vue acoustique, il faut avoir une idée précise de leurs modes de fonctionnement. Une coopération étroite avec les autorités compétentes est généralement une condition nécessaire pour mener à bien un tel projet.

De même est-il important de fixer les objectifs d'une étude acoustique. Si un projet de recherche tel que REPORT vise avant tout l'appréhension et la compréhension des phénomènes et mécanismes en jeu, une étude réelle visera principalement la maîtrise et, si possible, la réduction de la gêne sonore subie par les riverains des installations portuaires. Le choix d'un objectif influencera nécessairement le plan de travail, les modélisations à produire, les mesurages à effectuer et les solutions qui peuvent être envisagées.

Tout projet d'étude du bruit des activités portuaires doit également prendre en compte les éléments suivants :

- Identifier les sources principales de bruit, et plus précisément celles occasionnant le plus de gêne sonore. Ce sont ces sources là qu'il faudra caractériser et modéliser avec un niveau de détail suffisant pour la poursuite des opérations.
- La nature particulière du bruit : les bruits impulsifs, à forte composante tonale, ou fortement chargés en (très) basses fréquences, sont perçus comme moins agréables et/ou plus gênants que les bruits continus.
- La fréquence et la répétition des événements sonores ainsi que leur durée sont des facteurs importants pour juger de la gêne qu'ils engendrent. Les activités, surtout dans les ports de petite et moyenne taille, sont très fluctuantes et les niveaux sonores souvent très variables dans le temps. La gêne engendrée dépend fortement de l'heure de la journée (et en particulier aux heures du lever ou

de coucher du soleil) ou peut être perçue et appréciée très différemment selon la saison (lorsque les gens ont tendance à fréquenter les terrasses ou à vivre les fenêtres ouvertes).

- Le choix du ou des indicateurs pertinents pour caractériser les effets étudiés. Alors que la Directive Européenne préconise l'utilisation des indicateurs L_{den} et L_n afin d'évaluer les effets du bruit sur la santé, il peut-être plus pertinent de mesurer et de simuler des indicateurs caractérisant le bruit sur de plus courtes durées, comme par exemple le bruit lorsqu'un navire particulier est à quai, ou pendant une certaine phase de débarquement et/ou d'embarquement. Pour bien caractériser des événements sonores particuliers, l'emploi d'indicateurs tels que le $L_{A,max,S}$ peut être utile, bien qu'il se prête moins bien aux simulations.
- La topographie du site et plus particulièrement la distance de la source aux zones d'habitation les plus proches et le relief, qui peut avoir des effets importants sur la propagation du bruit, en particulier lorsqu'il induit une vue plongeante sur le port.
- Dans certain cas, les conditions météorologiques particulières qui existent en bord de mer avec des vents dominants changeant selon la saison et/ou l'heure de la journée, peuvent être la source de gêne plus importante, mais limitée dans le temps, que ce que laisse entrevoir une simple moyenne annuelle.
- Les intérêts économiques et touristiques, notamment lorsque les quais sont aménagés en zones de promenade ou d'agrément ou encore lorsqu'une partie du port a fait l'objet d'une requalification urbaine.

L'étude du bruit des activités portuaires commence généralement par une modélisation du port et de son environnement, de ses installations et des navires qui le visitent. La modélisation concerne autant la topographie du site et la localisation des sources principales que le fonctionnement du port dans sa dimension temporelle.

Par modélisation, nous entendons ici la construction (mentale) d'une représentation simplifiée de la réalité, couvrant tous les éléments et aspects (statiques et dynamiques) nécessaires pour appréhender les relations essentielles (et causales) entre les activités qui y ont lieu et le bruit produit dans l'environnement. Il va de soi, que l'ensemble des activités sur le site doit être pris en compte, tout comme le trafic routier ou ferroviaire directement lié à ces activités.

Le niveau de détail d'une telle modélisation doit être choisi judicieusement en fonction des objectifs visés. Un niveau de détail trop faible ne permettra pas d'expliquer l'expérience vécue par les riverains, ni d'aboutir à des solutions optimales, ou du moins acceptables pour tous. Un niveau de détail trop élevé (qui peut avoir son intérêt

scientifique) au contraire se heurtera rapidement à une indisponibilité des données d'entrée nécessaires pour la mise en œuvre d'un programme de modélisation trop ambitieux. Il est bon de se rappeler que, quelque-soit le modèle et quelques-soient les techniques de simulation, les résultats produits ne sauraient dépasser ni en qualité, ni en précision les données d'entrée et les hypothèses faites pour combler leur manque. Là encore, la coopération avec les autorités portuaires et les exploitants doit être recherchée afin de disposer, au moins, des données de trafic annuel, du plan d'affectation des quais et des évolutions futures planifiées ou prévues.

La particularité des activités portuaires, très variées, dispersées et peu reproductibles entre différents ports, même de taille comparable, rend nécessaire une approche hybride dans laquelle la caractérisation expérimentale des sources joue un rôle essentiel. Un plan de campagne pour les mesurer doit être établi avec l'objectif précis de produire un maximum d'informations exploitables dans la modélisation.

Le modèle ainsi construit doit avant tout être en mesure de reproduire l'existant. Une seconde campagne de mesures peut être utile afin de valider, et si besoin ajuster, le modèle.

Ce n'est que lorsque l'ensemble des parties prenantes ont une confiance suffisante dans la capacité du modèle à fournir une représentation suffisamment détaillée et fiable de la réalité que l'on peut commencer son exploitation à proprement parler, c'est-à-dire prédire l'avenir, que ce soit en termes d'augmentation du trafic maritime, de réaménagement des quais et voies d'accès, de transfert modal, ou de mise en œuvre de dispositifs visant à réduire la génération et/ou la propagation du bruit.

Les techniques utilisées pour simuler les évolutions futures ne sont pas spécifiques au bruit des ports et se basent sur des méthodes robustes et fiables, développées en grande partie pour d'autres types de sources. Étant donné la stricte séparation de la modélisation des sources et de la propagation du son, une telle transposition ne pose pas de problème particulier. La fiabilité des prévisions dépendra en premier lieu de la modélisation des sources particulières présentes sur les sites portuaires et c'est là une bonne raison pour que ce sujet ait été traité avec la plus grande attention dans le projet.

Dans certain cas, il peut être utile de présenter les résultats non seulement sous forme de chiffres ou de cartes de couleurs, mais également de rendre ceux-ci sous la forme de réalité audio-visuelle virtuelle ou augmentée afin de les rendre accessibles au plus grand nombre.

5.1.1 Vade-mecum des méthodes de surveillance (+ARPAT)

On donne ci-dessous différents types de méthodes de surveillance pouvant être utiles à la gestion du bruit des zones portuaires.

- Mesures ponctuelles proches des sources

Il s'agit d'effectuer des mesures à proximité des sources afin de caractériser les sources sonores séparément pour alimenter les modèles de prévision du bruit. Ces mesures permettent d'estimer la puissance des sources connaissant la distance de propagation depuis le point d'émission principal de la source jusqu'au point de mesure ainsi que l'environnement proche susceptible d'influencer la propagation du son.

- Mesures intermédiaires de validation du modèle de prévision

Il s'agit de réaliser des mesures intermédiaires permettant de valider la modélisation des sources par comparaison des niveaux mesurés et calculés en des points précis du site.

- Surveillance acoustique et détection d'anomalies

Un protocole de mesurage permanent est mis en place avec pour objectif la surveillance des émissions acoustiques sur la zone portuaire et la détection éventuelle d'anomalies. Les capteurs sont associés à des outils d'intelligence artificielle permettant de détecter et signaler des niveaux excédant les seuils prescrits ou bien de nouvelles sources sonores potentiellement gênantes.

- Mesures ponctuelles de l'exposition

Il s'agit de réaliser un mesurage ponctuel de l'exposition au bruit portuaire pour une zone riveraine, suite par exemple à une plainte, ou bien pour l'évaluation de l'efficacité de mesures correctives mises en place dans le cadre de plans d'actions bruit.

- Solutions de monitoring permanentes et/ou ponctuelles

Ces solutions permettent de contrôler l'exposition des riverains au bruit portuaire sur des durées longues lorsque les capteurs sont installés de manière permanente ou des durée plus courtes dans le cas d'installations provisoires. Ces solutions incluent un système d'enregistrement des données mesurées facilitant la consultation des niveaux mesurés a posteriori et le calcul d'indicateurs agrégés sur des périodes longues.

5.1.2 Type de mesures de réduction du bruit

On donne ici plusieurs familles de mesures de réduction du bruit des zones portuaires.

- Planning urbain, zonage

Le zonage est de loin la plus efficace si l'on peut garantir un éloignement suffisant entre les sources de bruit et les habitats les plus proches. Elle est cependant difficile à mettre en œuvre dans les petits ports, souvent contraints par la géographie des lieux. Les grands ports (Marseille, Gênes) ont réussi à éloigner les activités portuaires ; les terrains ainsi

dégagés étant intégrés dans des grands projets de requalification urbaine.

- Aménagements urbains

Des aménagements urbains spécifiques peuvent apporter une réduction du bruit propagé significative. Parmi ces aménagements, on peut citer les écrans bas, les mobiliers urbains acoustiques, les routes en tranchées (même peu profondes), les couvertures partielles. Dans tous les cas, le principe est de masquer les sources de la vue pour gagner 5 à 6 dB d'atténuation sur la propagation. Il est également possible d'exploiter judicieusement le relief afin de masquer la vue sur les sources de bruit sans masquer la vue sur la mer comme indiqué sur les deux schémas ci-dessous.

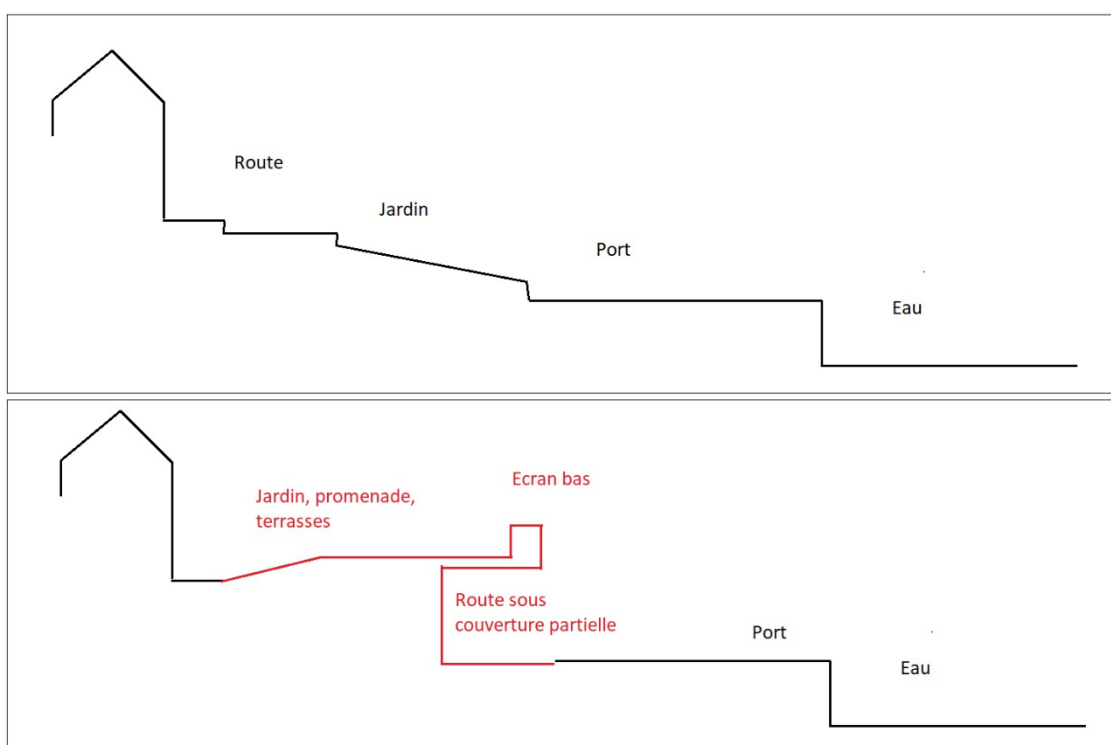


FIGURE I.3: EXEMPLE D'AMENAGEMENT URBAIN DIMINANT LES NUISANCES SONORES DU PORT.

Il convient de noter que de telles solutions sont peu ou pas prises en compte dans les méthodes prévisionnelles habituellement utilisées pour la cartographie. Le logiciel MithraSIG permet de les modéliser avec une grande précision à l'aide de sa méthode hybride et d'extensions dédiées.

- Gestion du port

Les autorités portuaires peuvent mettre en place plusieurs actions adaptées pour diminuer les nuisances sonores. On peut mentionner en particulier le choix des quais et les horaires de fonctionnement. Il est également recommandé de favoriser l'information du public, la concertation et la co-construction des solutions avec les riverains.

- Matériel de levage et de manutention

Le remplacement des matériels à moteurs thermiques par des engins électriques peut contribuer de manière significative à la diminution des nuisances liées à la manutention des marchandises, ainsi que dans une moindre mesure le remplacement des engins à moteurs diesel par des moteurs au gaz naturel, moins polluants et également généralement moins bruyants. Des opérations régulières de maintenance préventive et corrective permettent aussi d'éviter les bruits gênants générés par des défauts de fonctionnement.

- Bruit des transports terrestres

Il est également possible de réduire le bruit des transports terrestres liés à l'activité portuaire par la mise en place de contournements, de parkings aménagés, ou encore de revêtements silencieux (bien que l'effet soit faible aux basses vitesses de circulation).

- Influences sur la propagation du bruit

Parmi les mesures impactant directement la propagation du bruit, la mise en place d'écrans acoustiques proches des sources semble généralement difficile compte-tenu de l'étendu des zones d'activité. A l'opposé, l'installation d'écrans à proximité des habitats les plus proches constitue une solution efficace, mais peu appréciée si elle engendre par ailleurs une vue masquée, en particulier sur la mer. Il existe également des moyens naturels (arbres, buissons, végétation...) dont les effets réels ont été étudiés par les scientifiques : voir par exemple les recommandations du projet Européens FP7 Hosanna. Il faut également mentionner la solution des écrans bas proches des voies ferrées qui présente une efficacité importante pour les sources ferroviaires.

- Promouvoir des navires plus silencieux

L'électrification des quais constitue une mesure efficace qui permet aux navires de ne pas faire usage de leurs générateurs électriques à bord utilisant le plus souvent des moteurs diesel. Cette mesure mérite des études plus poussées afin d'établir sa faisabilité pour les différents types de navires, en particulier les ferries, les cargos et les bateaux de croisière.

5.1.3 Vade-mecum/méthodologies pour l'application et l'exploitation des méthodes de prévision.

On rappelle ici plusieurs principes méthodologiques à prendre en compte pour la bonne application des méthodes prévisionnelles du bruit portuaire. Ces principes sont résumés ci-dessous.

- Tenir compte de l'indicateur pertinent retenu et construire le modèle en fonction de l'objectif.

- Sélectionner un niveau de détail approprié à la problématique
- Couvrir l'ensemble des activités portuaires en prenant en compte leur variabilité spatiale et temporelle.
- Modéliser AVANT de mesurer et mesurer en vue d'une exploitation dans les simulations. Simuler afin d'évaluer la pertinence d'une mesure.
- Caractériser expérimentalement les sources de bruit. Cette étape est souvent indispensable puisque chaque navire, chaque installation est particulière.
- Prendre en compte les effets spécifiques tels que la géométrie des navires, la topographie du terrain, et les effets météorologiques particuliers en bord de mer
- Modéliser le fonctionnement des sources sous la forme de séries temporelles (24 fois 1 heure)
- Modéliser les niveaux d'exposition en moyenne sur de longues périodes à partir de
 - La puissance équivalente par période jour, soirée, nuit
 - La propagation en moyenne annuelle, saisonnière, selon l'heure de la journée

Une modélisation fine des activités portuaires produira en général une quantité importante de résultats partiels entrant dans le calcul des indicateurs globaux. Ces résultats ne sont pas pour autant inutiles puisqu'ils peuvent servir à une gestion plus fine de la gêne sonore due aux activités portuaires et à l'évaluation rapide de certaines actions visant à réduire la gêne subit.

En particulier, lors de l'instruction des dossiers d'impact ou dans le cadre de plaintes de la part des riverains, il est judicieux de considérer les niveaux sonores réels qui existent lorsque le navire est présent dans le port et de ne pas se fier aux indicateurs tels que le Lden qui ont été introduits pour des raisons spécifiques comme l'évaluation des effets du bruit sur la santé.

6. ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE

La validation de l'outil développé par le partenaire du CSTB a eu lieu en comparant les résultats obtenus grâce à cet outil avec les résultats obtenus grâce à un logiciel commercial actuellement disponible dans la modélisation d'un scénario portuaire. En particulier, la validation a exploité les résultats des campagnes de caractérisation acoustique de trois navires dans le port de Cagliari pour reconstituer autant de scénarios dans MithraSIG 5.4 et dans SoundPLAN 8.1. Dans la Figure I.2 les régions du port de Cagliari objet des simulations sont mises en évidence. Suite à la

modélisation des scénarios, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus par les deux logiciels en termes de niveaux de bruit.

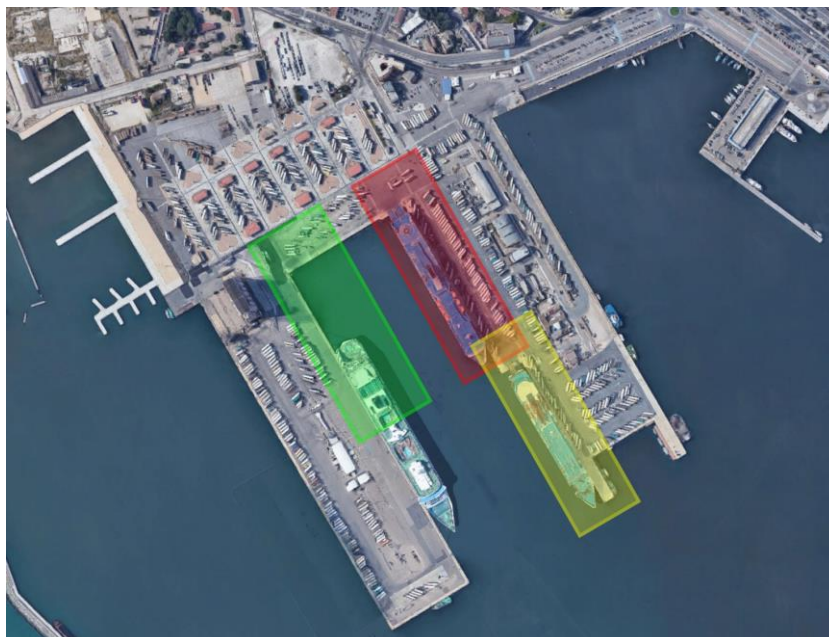


FIGURE I.2: LES QAIS DU PORT DE CAGLIARI CORRESPONDANT AUX SCENARIOS MODELISES : JETEE « SABAUDO » EN ROUGE, JETEE « DENTE SABAUDO » EN JAUNE ET JETEE « LEVANTE RINASCITA » EN VERT.

Pour obtenir les puissances sonores et les spectres des sources présentes dans les navires, un outil spécial de SoundPLAN 8.1 a été utilisé qui exploite les relations inverses du calcul de propagation. Afin d'utiliser cet outil, les trois scénarios sur SoundPLAN 8.1 ont été préalablement reconstruits, indiquant les niveaux de bruit mesurés, les stations de mesure et les positions des sources du navire, dont une zone représentant les opérations de chargement et de déchargement. Les puissances sonores et les spectres obtenus par l'instrument ont ensuite été attribués aux sources respectives. Nous soulignons comment dans cette phase la coque des navires a été insérée manuellement via l'outil de modélisation du bâtiment. Dans la Figure I.3 le modèle du Molo Sabaudo dans SoundPLAN est montré à titre d'exemple.

Ainsi, après avoir défini les caractéristiques des sources, il a été possible de procéder à la modélisation au sein de MithraSIG grâce à l'outil Port et aux outils spécifiques à la zone portuaire mis à disposition. Les outils, comme déjà décrits, permettent l'introduction d'un modèle 3D précis du navire basé sur des quotas fournis par l'utilisateur et l'insertion des différentes sources sonores du navire selon des schémas prédéfinis. Dans les deux logiciels, la modélisation des phases de chargement/déchargement a eu lieu à l'aide d'outils génériques tels que des sources surfaciques et ponctuelles.



FIGURE I.3: LES SOURCES DE LA JETEE SAVOY AU SEIN DU LOGICIEL SOUNDPLAN.

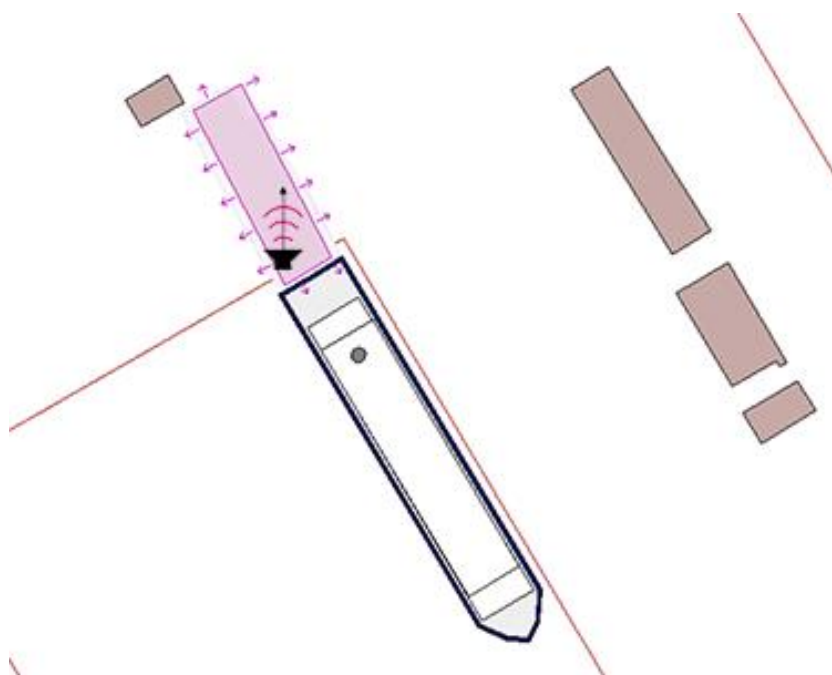


FIGURE I.4: LES RESSORTS DE LA JETEE SAVOY AU SEIN DU LOGICIEL MITHRASIG.

Malgré les divers différences constatées entre les deux logiciels, une fois les méthodes de saisie standardisées, la différence entre les résultats au niveau des récepteurs était inférieure à ± 1 dB (A) (Tableau I.2).

Scénario	Receveur	SoundPLAN	MithraSIG	Delta
----------	----------	-----------	-----------	-------

		L _{Aeq} (06-22) [dB(A)]	L _{Aeq} (06-22) [dB(A)]	L _{Aeq} (06-22) [dB(A)]
Quai Sabaudo	P01 - Molo	88.2	87.6	0.6
	P02 - Fabbricatino (Bar)	88.3	87.4	0.9
Quai Dente Sabaudo	P01 - Molo	93.8	93.8	0.0
	P02 - Sabaudo ext (6° ormeaggio)	78.8	78.7	0.1
Quai Levante Rinascita	P01 - Molo	95.3	95.0	0.3
	P02 - Fabbricatino	90.8	90.6	0.2
	P03 - Fabbricatino (bar)	73.6	73.6	0.0

TABLEAU I.2 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS OBTENUES AVEC SOUNDPLAN ET MITHRASIG.

Les difficultés rencontrées dans la réalisation du scénario ne sont imputables qu'à deux cas.

Dans le cas du bruit de ventilation placé sur les côtés des objets du navire, à l'aide de l'outil Porto, il était difficile de positionner les sources ponctuelles dans leurs positions réelles, cependant cela n'a pas entraîné de différence dans les résultats, probablement à cause de leur puissance acoustique (L_w) était beaucoup plus faible par rapport aux autres sources actives, en premier lieu celle des entonnoirs. De plus, à longue distance, de faibles écarts de positionnement de certaines sources de faible puissance acoustique sont imperceptibles en termes de niveau sonore.

Une autre cause de complications était l'utilisation de la source volumétrique comme simple source surfacique : il s'agissait d'une série de tentatives pour pouvoir standardiser les deux modes de représentation de l'activité de chargement/déchargement portuaire à quai.

Le résultat en termes de différence entre les niveaux est considéré comme acceptable, donc les résultats des deux logiciels peuvent être considérés comme équivalents.

Pour affirmer cela, il faut tenir compte du fait que le calcul effectué avec un logiciel de modélisation 3D implique une incertitude intrinsèque due aux erreurs possibles causées par ce qui, en effet, est une approximation de la réalité, et à certaines caractéristiques de la source et du récepteur. Selon la réglementation technique en vigueur, compte tenu de la hauteur des sources en jeu et des distances source/récepteur, l'erreur intrinsèque à associer aux simulations effectuées est de l'ordre de ± 1 dB(A), on peut donc conclure que la validation est particulièrement satisfaisante.

In fine, le logiciel développé par le partenaire du CSTB permet une insertion rapide d'un navire complet avec ses principales sources sonores au sein d'un modèle 3D d'une zone portuaire sans compromettre la qualité des résultats. Ceci constitue une

économie significative en termes de temps et de ressources qui augmente avec l'augmentation du nombre de navires impliqués.

Au moment de la validation, il n'était pas possible d'indiquer le temps pendant lequel un seul navire était présent ou non au port, mais seulement le pourcentage de temps pendant lequel ses sources étaient actives, l'utilisation de l'outil s'est donc limitée aux modélisations de scénarios bien définis qui ne prévoient pas l'alternance de nombreux bateaux. Par exemple, cela excluait son utilisation dans des études d'exposition sur des périodes prolongées dans lesquelles la géométrie du scénario rend les effets d'ombre géométrique générés par les bateaux non négligeables. Néanmoins, dans les scénarios où les bateaux n'interfèrent pas significativement avec la propagation du bruit provenant d'autres sources, l'outil développé a tout de même garanti une pleine validité et a permis d'énormes économies en termes de temps de modélisation, et donc de ressources économiques à investir. Cependant, avec la sortie des mises à jour récentes, une fonction a été mise en place qui doit permettre de prendre en compte le temps passé par le navire à quai et donc de réaliser des études sur des périodes prolongées en considérant correctement les effets d'ombre géométriques provoqués par la présence ou absence de bateaux. Cette fonctionnalité, si elle est confirmée valide, permettra une modélisation de zones portuaires complexes avec des temps bien inférieurs et une précision supérieure à celles actuelles.

7. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES DIRECTIVES LE PROJET DECIBEL

On donne ici une synthèse des résultats obtenus dans le cadre du projet DECIBEL pour leur transposition à d'autres contextes portuaires. Ces résultats sont exposés successivement dans les trois domaines suivants :

- 1/ les méthodes de surveillance du bruit portuaire
- 2/ les mesures de réduction du bruit
- 3/ les méthodes prévisionnelles pour l'exposition au bruit d'origine portuaire.

7.1 *Vade-mecum des méthodes de surveillance,*

Les méthodes de surveillance du bruit portuaire ont un double objectif :

- vérifier que l'objectif visé par les plans d'actions mis en place a été atteint ;
- suivre dans le temps la situation de pollution sonore que l'on a cherché à traiter. A nouveau, la manière de mener ce suivi sera très dépendante de l'action choisie.

7.1.1 Vérification de l'effet du plan d'action

Pour vérifier l'effet de l'action corrective, il convient de mener si possible deux campagnes de mesure in situ : une avant mise en œuvre de l'action, et une après. Dans la mesure du possible, on conservera les mêmes points de mesurage, les mêmes périodes et les mêmes indicateurs entre les deux campagnes.

Deux approches sont possibles :

- Vérifier l'objectif de réduction de la pollution sonore dans la zone à enjeu : dans ce cas, on définit plusieurs points de mesurage dans la zone à enjeu ainsi que les périodes temporelles (saison et moment de la journée) concernées, et on vérifie que les indicateurs et les seuils définis dans la phase d'analyse du plan d'action sont respectés.
- Vérifier l'objectif de réduction au niveau de la source : dans ce cas, on peut utiliser la méthode de caractérisation du niveau de puissance de la source, ou encore constater la modification des changements des conditions d'opération.

Dans le cas où une seule campagne de mesure uniquement est possible, on la conduit après mise en œuvre de l'action et dans ce cas on cherchera à vérifier le respect de l'objectif fixé, préférablement au niveau de la source (vérification de la diminution du niveau de puissance ou des nouvelles conditions d'opération).

7.1.2 Suivi dans le temps de l'effet du plan d'action

En fonction de l'action, il peut être nécessaire de vérifier aussi sur le long terme son effet de réduction de la pollution sonore. Cette pratique est particulièrement recommandée dans le cas où l'action consiste en la mise en place d'une solution technique qui peut potentiellement s'endommager avec le temps. Ce serait le cas par exemple pour un revêtement de chaussée ou encore une modification technique sur une source de bruit. Dans ce cas, il convient de proposer au moment de la mise en place du plan d'actions une méthode de suivi, ainsi qu'une périodicité du suivi (par exemple, tous les ans). La méthode peut être de plusieurs types en fonction de la solution et de la périodicité : vérification visuelle, mesure acoustique dans une zone à enjeu, mesure de caractérisation d'une source, voire même remplacement de la solution. Ceci sera à définir en fonction des actions et des capacités des parties prenantes concernées.

7.2 *Type de mesures de réduction du bruit*

Suite au diagnostic de la situation existante, les actions possibles pour réduire la pollution sonore sont très dépendantes de la source concernée et aussi du niveau de réduction que l'on cherche à atteindre. On rappelle ici quelques principes généraux suivis de quelques exemples.

7.2.1 Principes d'établissement du plan d'actions

- Rassembler les parties prenantes, leur présenter les conclusions du diagnostic, et établir avec elles un cadre des actions possibles (en effet, en fonction des intérêts et des possibilités techniques et financières, il est clair que toutes les actions ne seront pas envisageables)
- A partir de l'analyse et du cadre des actions possibles, proposer des objectifs qualitatifs d'ambition différenciée (diminution modérée, moyenne ou forte) et si possible associer des éléments de coûts
- Traduire chaque objectif qualitatif en objectif quantitatif dans les zones à enjeu, en reprenant le(s) même(s) indicateur(s) que celui/ceux par lequel la pollution sonore a été établie (typiquement, on pourra fixer comme objectif que l'indicateur utilisée dans la zone à enjeu retombe en dessous de la valeur seuil fixée dans l'analyse)
- En réutilisant le modèle de calcul, établir l'objectif de réduction de la source principale pour atteindre l'objectif de réduction dans les zones à enjeu, par exemple en identifiant la réduction nécessaire du niveau de puissance ou encore la modification nécessaire du scénario journalier d'activation de la source principale concernée
- Identifier les possibilités et les contraintes (techniques, administratives, financières, etc.) pour atteindre l'objectif de réduction de la source avec les parties prenantes concernées : est-il possible de changer le matériel ? de rajouter une protection sonore (capotage, écran, etc.) ? de modifier les conditions d'opération (changement de vitesse, diminution de la cadence, etc.) ?
- Identifier une ou plusieurs stratégies possibles par objectif qualitatif, en fonction des contraintes
- Rassembler toutes les parties prenantes une nouvelle fois, leur proposer les stratégies identifiées, et conclure sur l'action à mener

7.2.2 Exemples de stratégies de réduction

De manière générale, les mesures de réduction peuvent inclure les points suivants :

- Diminuer le bruit de trafic routier ou de manutention horizontale : former les opérateurs pour limiter les émissions sonores, limiter la vitesse de circulation, limiter l'utilisation de véhicules bruyants, changer le revêtement de chaussée, installer un ouvrage antibruit, ...
- Diminuer le bruit issu des navires : limiter l'utilisation de sources bruyantes en approche ou à quai, décaler les horaires d'opération, étendre les périodes de chargement/déchargement, remplacer un élément bruyant d'un navire, installer un dispositif sur les quais, ...
- Diminuer les bruits d'équipements industriels : modifier les conditions d'opération pour qu'elles soient moins gênantes, installer un capotage, ...

- Mettre en place une action dans les zones à enjeu, par exemple par le remplacement des fenêtres dans le cas d'un bâtiment isolé où il y a gêne, due à une activité prolongée.

Les actions ciblées dans le cadre du projet DECIBEL et des 4 ports insulaires étudiés concernent plus particulièrement :

- Pose d'asphalte insonorisant pour la réduction du bruit routier
- Mise en place d'amortisseurs de vibrations afin de réduire les bruits d'impact générés par la montée / descente des véhicules des navires
- Mise en place de l'électrification des quais afin de supprimer le bruit des générateurs embarqués qui nécessitent le fonctionnement de moteurs thermiques sur le navire et de la ventilation associée à ces moteurs
- Remplacement des véhicules utilitaires à moteurs thermiques utilisés sur le port par des véhicules électriques

7.3 Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision.

Le projet DECIBEL propose une méthodologie en 6 étapes pour la réalisation d'un diagnostic prévisionnel de l'exposition au bruit généré par les installations portuaires dans le cas de ports insulaires.

7.3.1 Etape 1 - Identification des parties prenantes

Compte-tenu du positionnement des ports insulaires urbaines comme zones d'interface, il est nécessaire d'identifier les parties prenantes des activités du port, et ce afin de mettre en regard le bénéfice socio-économique des activités portuaires vis-à-vis de potentielles nuisances sonores générées, ainsi que les éventuelles responsabilités de chaque partie prenante quant à la génération de pollution sonore.

De plus, afin d'orienter le diagnostic au plus près des problématiques majeures en termes de pollution sonore, il est nécessaire d'identifier si des plaintes, formelles ou informelles, ont été émises par les riverains de la zone portuaire. Cela permet d'orienter l'analyse sur les sources de bruit les plus problématiques, ce qui est indispensable au vu du nombre important des sources de bruit existantes dans une zone portuaire.

7.3.2 Etape 2 - Définition des limitations spatiales de l'étude

On cherche à définir deux zones géographiques sur plan masse : la zone géographique d'émission sonore dans laquelle les sources sonores sont considérées comme émanant de l'activité portuaire et la zone géographique d'impact sonore où ces bruits peuvent causer une gêne sonore.

La zone géographique d'émission sonore est constituée :

- de tout ou partie du port lui-même, au sens légal,
- de segment de voies de transport maritime, routier et ferroviaire, situés en-dehors du port mais dont l'activité est considérée comme faisant partie de l'ensemble du bruit généré par l'activité portuaire,
- de tout autre élément bruyant situé en-dehors du port mais considéré comme faisant partie de l'ensemble du bruit généré par l'activité portuaire.

La zone géographique d'impact sonore doit comprendre :

l'ensemble des points ou des aires de réception pour lesquels on désire évaluer ou mesurer l'impact sonore du port, d'une activité particulière du port ou d'une solution de réduction du bruit,

la zone d'influence de la propagation sonore, c'est-à-dire (généralement à dire d'expert) l'ensemble des éléments topographiques et bâtis permettant de prévoir, avec suffisamment de précision, la propagation du bruit entre tous les éléments sources d'intérêt et tous les points et aires récepteurs.

Une bonne définition de ces zones permettra de limiter un trop grand nombre de données géographiques (terrain, routes, bâtiments...) n'ayant quasiment aucune influence sur les calculs prévisionnels, ainsi que d'optimiser les temps de simulation.

7.3.3 Etape 3 - Fonctionnement du port et identification des sources

Les ports urbains insulaires présentent une grande variété d'activités et donc de sources sonores dont les conditions de fonctionnement sont également très variables. Il est donc indispensable de lister et documenter non seulement les sources de bruit principales (à prendre en compte dans la zone géographique d'émission sonore), mais aussi le scénario d'utilisation de chaque source dans le temps.

Pour chaque source, il convient donc de définir les points suivants :

Le type de sources

Les périodes de variabilité annuelle, représentatives de fonctionnement suffisamment différencié, typiquement les saisons d'activité (basse, moyenne et haute) ou encore la distinction entre jour de semaine et weekend

Le scénario journalier d'activation, spécifiant soit le pourcentage de temps d'activation de la source, soit le nombre et la durée d'activation moyens de la source, par heure de la journée, pour chaque période annuelle représentative (par exemple le nombre d'embarquement et débarquement)

Une explication sommaire sur la source (qu'est-ce qui émet le bruit ? quelles sont les conditions d'activation éventuelles ?)

Le cas échéant, on peut décrire les sources comme ayant un scénario d'utilisation très simple, par exemple « continu ». Ce serait le cas pour le trafic routier sur les voies communales par exemple, que l'on décrit uniquement par une donnée journalière moyenne, comme par exemple le Trafic Moyen Journalier Annuel (TMJA).

7.3.4 Etape 4 - Rassembler les données nécessaires

Une fois les sources principales identifiées et définies, il convient de rassembler toutes les données nécessaires à la constitution du modèle qui servira à la réalisation des calculs prévisionnels, et ce dans les zones spatiales définies à l'Etape 2. Les données nécessaires sont listées ci-dessous.

Données géographiques (géoréférencées)

Topographie / terrain

Bâtiments : définis par la trace au sol et la hauteur ou par des volumes simples, avec si possible un attribut d'utilisation (habitation, tertiaire, etc.)

Occupation du sol : étendues d'eau, parcs, parkings, etc.

Tronçons de routes si possible classées par infrastructure, comprenant également le type d'enrobé

Tronçons de lignes ferroviaires

Limite terre/mer et limite administrative du port

Ces données seront de préférence fournies en format SIG (par exemple format SHP) et géoréférencées. Concernant les bâtiments, on peut mentionner que les containers ou les remorques doivent a priori être modélisées comme des bâtiments, du moment que leur taille est significative.

Données de trafic terrestre

Trafic routier : données de volume de trafic (TMJA ou trafic moyen par période journalière) et pourcentage de véhicules lourds, associés aux tronçons de route (si possible sous forme d'attributs liés aux objets de tronçons)

Trafic ferroviaire : données de nombres de passage par heure et type de convois ferroviaires, associés aux tronçons de route (si possible sous forme d'attributs liés aux objets de tronçons)

Concernant le pourcentage de véhicules lourds, à défaut de données plus précises, on pourra définir un pourcentage unique pour l'ensemble du réseau routier (par exemple 10%).

Données de trafic maritime

Trajectoire, lieu et position d'amarrage dans le port et horaires d'arrivée / départ des navires, par période annuelle d'intérêt et par heure de la journée

Description géométrique des navires (longueur, hauteur hors d'eau, largeur)

Ces données peuvent être demandées à l'autorité de gestion du port à l'étude, ou à défaut aux compagnies opérant des voies maritimes depuis et vers le port à l'étude.

Données de niveaux de puissances des sources de bruit (hors trafic « normal »)

Niveaux de puissance : par bande de fréquences (tiers d'octave ou octave), a minima de 100 à 5000 Hz, voire au-delà si la source présente un contenu fréquentiel important hors de ces valeurs

Directivité, que l'on peut supposer par défaut omnidirectionnelle pour les sources ponctuels, et hémisphérique pour les sources proches du sol ou accolées à un

objet volumineux (comme un navire ou un bâtiment)

Ces données nécessitent dans la plupart des cas une campagne de mesure spécifique. On pourra par exemple effectuer un ensemble de mesurages de niveau de pression L_p proches des sources à caractériser (typiquement moins de 10 m) et revenir à un niveau de puissance L_w par bande de fréquence en utilisant les relations suivantes (r étant la distance entre la source et le point de mesurage) :

$L_w = L_p + 10 \log(4\pi r^2)$, dans le cas d'une source sans obstacle de grande taille à proximité (source omnidirectionnelle en champ libre)

$L_w = L_p + 10 \log(2\pi r^2)$, dans le cas d'une source proche d'un objet volumineux ou du sol, (source hémisphérique)

Ces relations sont approchées et ne sont valides que lorsque le microphone de mesure est suffisamment loin d'un objet réfléchissant

De plus, dans la mesure du possible, il est également conseillé d'utiliser l'enregistrement audio et vidéo des séquences mesurées afin de faciliter la compréhension a posteriori des fonctionnements des sources qui ont été caractérisées.

Données météorologiques

Données météorologiques sur une année, par heure et classifié en jour/nuit, comprenant :

- la vitesse moyenne du vent mesurée à une certaine hauteur du sol (par exemple à 10 m),

- la direction moyenne du vent (d'où vient le vent par rapport au nord), en degrés

- la nébulosité (mesurée par exemple en octa, de 0 à 8)

Ces données peuvent être issues d'une station de mesure opérée par un organisme national (Meteo France ou MeteoAM) ou régional, même si celle-ci est à plusieurs kilomètres du port. Les données météorologiques doivent ensuite être traitées pour établir une rose d'occurrence de conditions favorables, en fonction de la direction du vent et de la période (voir l'Etape 5).

Remarque en cas de difficulté à obtenir certaines données

Certaines données peuvent être difficiles à acquérir, notamment les données topographiques précises ou encore les données météorologiques. Dans ce cas, il est recommandé à l'équipe en charge de la réalisation de l'étude d'utiliser le plus possible les bases de données ouvertes, par exemple :

- OpenStreetMap pour les données géographiques générales (bâtiments, routes, etc.)

- les données SRTM pour la topographie

- la base de données de sources sonores issue du projet Imagine (accessible par exemple via l'outil SourceDB)

On peut mentionner que le logiciel MithraSIG v5 développé par Geomod et le CSTB possède plusieurs fonctionnalités qui facilitent l'intégration depuis ces bases de données ouvertes.

Concernant les données météorologiques, on se rapportera au paragraphe dédié dans l'Etape 5.

7.3.5 Etape 5 - Création du modèle et calcul des indicateurs de bruit

Une fois les données rassemblées, il convient d'utiliser un logiciel d'étude d'impact acoustique qui permet la création d'un modèle de calcul, que l'on pourra ensuite utiliser pour quantifier la pollution sonore. Le processus à suivre pour intégrer toutes les données dans le modèle est spécifique à chaque outil, et donc on se rapportera au manuel d'utilisation du logiciel choisi. On précise cependant dans cette partie quelques points importants pour définir les paramètres de calcul, en partie la méthode de calcul (CNOSSOS-EU) et la manière de représenter les effets météorologiques.

Méthode de calcul CNOSSOS-EU

Nous proposons d'adopter comme méthode prévisionnelle CNOSSOS-EU qui est la nouvelle méthode d'évaluation pour les indicateurs de bruit de la directive (UE) 2015/996. Cette dernière fait suite à la Directive END en modifiant notamment l'Annexe 2 où sont spécifiés les méthodes de prévisions pour y introduire un modèle d'ingénierie unifié CNOSSOS-EU obligatoire pour toutes les cartographies stratégiques du bruit (CSB) après le 1er janvier 2019. La partie de propagation acoustique de CNOSSOS-EU est très proche de la méthode française détaillée dans la norme NF S31-133 [2] (méthode de calcul française dite « NMPB'08 ») et donc parfaitement adaptée à la problématique de bruit issus des zones portuaires ou les phénomènes de diffraction par des obstacles, réflexion/absorption et multi-réflexions par des surfaces et des bâtiments, effets de sols, ainsi que les effets météorologiques moyens agissant sur la réfraction des ondes sonores à grande distance, sont modélisés avec suffisamment de précision mais sans un besoin de données inutiles pour le résultat recherché.

Dans CNOSSOS-EU, les sources sonores peuvent être décrites comme ponctuelles, linéaires, surfaciques voire volumiques, avec prise en compte d'une directivité spatiale possible. Pour la caractérisation du bruit des ports insulaires, la description des sources sonores pertinentes pourra être faite selon deux procédures : soit en considérant qu'il s'agit du bruit de trafic routier ou ferroviaire classique auquel cas les formules « sources » de la méthode CNOSSOS-EU pourront être appliquée, soit en considérant qu'il s'agit d'un bruit particulier (cheminée, ventilation, manutention, déchargement...) auquel cas un modèle sera créé à partir d'une ou plusieurs sources ponctuelle et/ou linéaire, à déterminer à partir de mesures in situ ou de résultats de la littérature.

Prise en compte des conditions météorologiques locales

Il s'agit de déterminer les roses d'occurrence météorologiques de conditions favorables à la propagation du son. Ces roses sont ensuite implémentées dans le logiciel de prévision de bruit de l'environnement MithraSIG (ou tout autre logiciel utilisant CNOSSOS-EU) afin de prendre en compte les spécificités locales de la météorologie.

Dans CNOSSOS-EU, la grandeur physique évaluée est le niveau sonore de long terme

LLT. Ce calcul s'effectue tout d'abord pour chaque trajet sonore *i* (soit *LLT, i*) et le niveau sonore total au récepteur est finalement obtenu par cumul des différents niveaux de long terme propre à chaque trajet.

Le niveau *LLT, i* est calculé pour une période jour (6h-18h pour la France), soirée (18h-22h) et une période nuit (22h-6h). Il prend en compte l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées sur le site et est calculé en faisant la somme énergétique du niveau sonore en conditions favorables à la propagation *LF, i* et le niveau en conditions homogènes ou non-favorables *LH, i*, pondérés par les occurrences respectives des conditions favorables *p* et des autres conditions $(1 - p)$, soit :

$$L_{LT,i} = 10 \log_{10} \left(p 10^{\frac{L_{F,i}}{10}} + (1 - p) 10^{\frac{L_{H,i}}{10}} \right)$$

Dans l'équation précédente, il est important de noter que *p* est fonction de trois paramètres : le lieu étudié (par exemple Bastia), la période d'étude (jour, soirée, nuit) et la direction moyenne du trajet sonore (par exemple, du nord-ouest vers le sud-est).

La détermination des conditions de propagation du son s'effectue à partir de la connaissance de la structure thermique et aérodynamique de l'atmosphère dans ses basses couches. Le lecteur se référera au projet DECIBEL pour une description détaillée de la méthode d'obtention des conditions de propagation à partir des paramètres météorologiques énoncés à l'Etape 4.

Remarque : stratégie possible en l'absence de données météorologiques spécifiques

Il peut être difficile d'obtenir les données météorologiques nécessaires à la création de la rose d'occurrence de conditions favorables. Dans les cas où ces données ne seraient pas accessibles, on pourra adopter une approche forfaitaire, qui par essence se veut être une approche conservatrice, c'est-à-dire qu'elle cherche à ne pas sous-estimer les niveaux, quitte à les surestimer. On pourra par exemple supposer 100% (soit $p=1$) de conditions favorables la nuit et 50% ($p=0,5$) le jour, et ce pour toutes les directions de vent, comme suggéré dans la méthode de calcul française.

Autres recommandations pour la réalisation des calculs

Concernant les sources sonores, il est nécessaire dans le modèle :

- d'introduire les sources spécifiques à l'activité portuaire et leur scénario d'utilisation, en tant que sources ponctuelles, linéaires et surfaciques

- de porter un intérêt particulier à la modélisation des navires qui peuvent être considérés, vu de l'extérieur, comme un bâtiment avec des sources sonores à ses limites,

- de pouvoir sauvegarder la contribution sonore de chaque source pour la phase d'analyse.

Concernant les paramètres de propagation sonore, on considère que :

- les surfaces d'eau et les bâtiments sont acoustiquement réfléchissantes,

- les containers sont modélisés comme des bâtiments réfléchissants dont

- les dimensions (*L x l x h*) sont à préciser,

- les jetées, notamment celles comportant des murs ou des brise-lames,

doivent être modélisés avec précision.

De plus, on recommande de considérer au moins 3 réflexions dans le calcul, cette recommandation étant à adapter en fonction de la taille de la zone d'étude et de la puissance de calcul disponible.

Définition des zones de récepteurs

Une fois tous les paramètres du modèle rentrés, il convient de définir quelles sont les zones géographiques pour lesquelles on souhaite évaluer et étudier la pollution sonore. On pourra utiliser plusieurs types de zones en fonction de la problématique :

En façade des bâtiments d'habitation, ce qui est généralement utilisé dans les approches réglementaires

Sur un domaine horizontal qui définit un espace public particulier, comme une place à proximité du port, à 1,5m de hauteur (soit à hauteur d'oreille humaine)

Points récepteurs particuliers, par exemple en limite de parcelle dans le cas d'une plainte

Définition des indicateurs pertinents

Plusieurs types d'indicateurs pourront être évalués aux récepteurs, selon la problématique étudiée :

Le LAeq, niveau sonore moyen (ou niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A), que l'on peut évaluer par heure, ou par plage horaire spécifique, par exemple 6h-8h, 18h-20h, jour (6h-18h), soir (18h-22h) et nuit (22h-6h)

Le Lden et le Ln, indicateurs d'exposition de long terme retenus dans les directive
END

Le ΔL , l'émergence sonore (ou différence de niveaux sonores moyens),

Le L_{Amax}, niveau sonore maximum (pondéré A), que l'on peut définir comme la valeur maximale du niveau de pression par intégration « slow » (intégration exponentielle sur 1 s), soit le L_{pAs,max}

Il est proposé que l'activité générale du port soit évaluée par le biais du LAeq horaire, ceci pour toutes les heures, soit 24 valeurs. D'autres plages horaires, pertinentes vis-à-vis du fonctionnement du port, pourront être proposées et obtenues par agrégation des résultats horaires. Comme précisé dans l'Etape 3, les calculs devront être effectués pour chacune des périodes de variabilité annuelle. On recommande également de sauvegarder dans les calculs les contributions de chaque type de source, et ce afin de faciliter l'analyse. On pourra ainsi afficher le niveau sonore en réception issu d'un seul type de source en fonctionnement, par exemple le bruit généré par le déchargement d'un navire de 6h à 8h.

Le cas échéant, on pourra évaluer l'impact de tout ou partie de l'activité du port par le ΔL , différence du niveau sonore avec et sans activité (« on/off » en d'autres termes). Dans ce cas, le bruit résiduel (bruit de fond) au niveau de la zone de réception peut être évalué par le bruit issu de tous les types de sources autres que celui étudié.

Uniquement dans certains cas très particuliers de bruits impulsionnels ou bruits de forte

intensité mais restant très ponctuels, et donc uniquement pour la caractérisation en réception de ces sources particulières, on pourra utiliser le LAmax avec comme donnée d'entrée au niveau de la source impulsionnelle dans le modèle prévisionnel, un niveau de puissance sonore maximum.

7.3.6 Etape 6 - Analyse des résultats

A partir des résultats de calcul, il convient de mener une analyse fine des résultats en fonction des sources retenues et des indicateurs pertinents identifiés. Cette analyse est fortement dépendante des problématiques et des indicateurs retenus, mais on peut mentionner que l'on pourra s'intéresser aux aspects suivants :

- Mise en perspective des résultats vis-à-vis de la réglementation locale du port

- Proposition de valeurs seuils traduisant des valeurs excessives de bruit, variables en fonction des indicateurs

- Identification des zones spatiales et des périodes temporelles à enjeu (dans lesquelles un ou plusieurs indicateurs dépassent les seuils)

- Analyse comparative de la contribution des différents types de source au niveau de bruit, ce qui permettra de comprendre les sources principales pour la pollution sonore en un endroit donné

- Mode d'affichage des résultats : zones horizontales de dépassement de seuil pour un indicateur, coloration des bâtiments dont un point en façade dépasse un seuil, comparaison des sources et conclusion sur les sources prépondérantes sur lequel travailler

Concernant les valeurs seuils pertinentes, il est a priori de la responsabilité du demandeur de l'étude de les définir, en s'appuyant par exemple sur la réglementation française ou italienne, ou des recommandations comme celles de l'OMS pour le bruit environnemental en Europe.

Cette étape doit se conclure par une description précise des zones et des périodes horaires à enjeu (où les indicateurs sont dépassés), ainsi que l'identification des sources principales qui sont la cause de la pollution sonore dans ces zones. Ceci est nécessaire pour lancer le plan d'actions..

SECTION II. ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DANS DES CONDITIONS DE TRAFIC VARIÉES PAR DES INTERVENTIONS DE GESTION ET DE RÉGULATION

1. INTRODUCTION

Cette section décrit les activités et les résultats de l'analyse du climat acoustique, du régime de mouvement et de la composition du trafic, en relation avec les conditions limites infrastructurelles du waterfront portuaire de la ville pilote d'Olbia, dans le but de développer un modèle de prédiction du trafic-bruit avec l'application de réseaux neuronaux artificiels pour soutenir les interventions de gestion et de régulation.

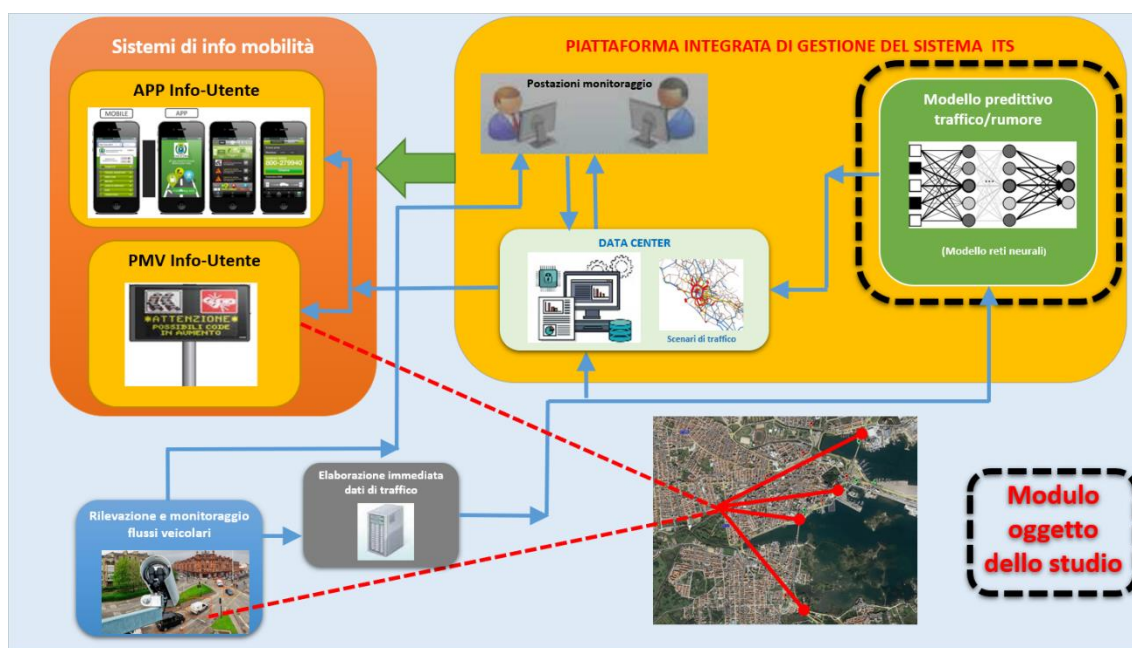


FIGURE II.1 - SCHÉMATISATION DU SYSTÈME ITS

Dans la première partie de l'étude (produit T2.2.1) seront illustrés les résultats des enquêtes simultanées sur le trafic-bruit, qui constituent la base d'information pour la mise en œuvre du modèle prédictif décrit développé dans le produit T2.2.2.

Le modèle a pour objectif d'évaluer en temps réel les niveaux d'émission de bruit générés par le trafic, selon lequel un système ITS, au moyen de messages d'info-mobilité destinés à l'utilisateur, transmis par des panneaux à messages variables (PMV) ou des applications pour appareils mobiles (APP), suggère des comportements de conduite et de déplacement (par exemple, la réduction de la vitesse), au point d'obliger les utilisateurs à emprunter des routes ou des itinéraires alternatifs. L'objectif du système ITS est de réorienter le trafic, en rationalisant les itinéraires, en particulier pour les flux

de véhicules qui ont pour origine et destination le port et ses environs, afin de réduire l'impact global généré dans les villes portuaires et donc de réduire les niveaux d'émissions sonores.

2. ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES FLUX DE TRAFIC ET DES ÉMISSIONS SONORES (RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.2.1)

2.1 ANALYSE ACOUSTIQUE ENVIRONNEMENTALE

Avant de procéder aux activités de relevé expérimental, une analyse acoustique environnementale de la zone portuaire de la ville d'Olbia a été réalisée afin de définir un cadre cognitif suffisamment exhaustif de tous les éléments qui contribuent à la détermination du climat acoustique et des scénarios de trafic et d'identifier les éventuelles criticités pour l'exécution ultérieure du plan de relevé et la construction du modèle de prévision acoustique.

Des données d'information ont été collectées, également sur représentation géo-cartographique, pertinentes pour la description du contexte socio-économique et démographique, du système de transport, du système environnemental, du cadre réglementaire de référence et de la planification territoriale.

2.1.1 Évaluation préliminaire de la zone d'étude, des points de mesure et des sections de route

Pour la campagne de mesure du climat acoustique, compte tenu du nombre de chaînes de mesure disponibles, on a d'abord émis l'hypothèse de trois positions de relevé de type " source orientée ", positionnées stratégiquement en fonction des sections de relevé du flux de trafic, visant à caractériser directement l'émission sonore attribuable au trafic automobile. Les points d'enquête choisis sont "frontières" dans la mesure où l'on a supposé qu'il s'agissait des points les plus exposés au bruit du trafic automobile selon une relation de cause à effet. Cette hypothèse a été confirmée par des mesures phonométriques préliminaires.

Après la vérification et l'évaluation des priorités dans l'utilisation des ressources, 10 sections de route ont été identifiées pour la surveillance du trafic et les 3 points d'acquisition phonométrique ont été confirmés pour toute la campagne expérimentale.

Id	Position	Type d'enquête	Coordonnées
Pos. A	Rotonda Sacro Cuore	Unité de contrôle fixe sur le poteau	4530549.91 N 542697.09 E
Pos. B	Via Principe Umberto en face de l'hôtel de ville	Unité de contrôle fixe sur le poteau	4530339.13 N 542530.94 E
Pos.C	Via Genova entrée du métro de la route	Unité de contrôle fixe sur le poteau	4530164.33 N 542339.46 E

TABLE II.1 LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE DU BRUIT

Un autre contrôle préliminaire a porté sur la sensibilité de l'ensemble de la chaîne de mesure à la corrélation entre les fluctuations temporelles des émissions attribuables au trafic et les fluctuations simultanées du climat sonore. Aux positions de mesure, le niveau de bruit de fond ambiant présente des valeurs acceptables et est suffisamment faible pour ne pas masquer le signal émis par les sources de trafic induites.

Les positions du relevé phonométrique de la campagne de surveillance sont fonctionnelles à la détermination du climat acoustique de l'état des lieux tant en période douce qu'en période de pointe, et à la mise en œuvre d'un modèle prévisionnel du climat acoustique en fonction de la variation de la structure des flux de véhicules, comme indiqué dans les paragraphes suivants.

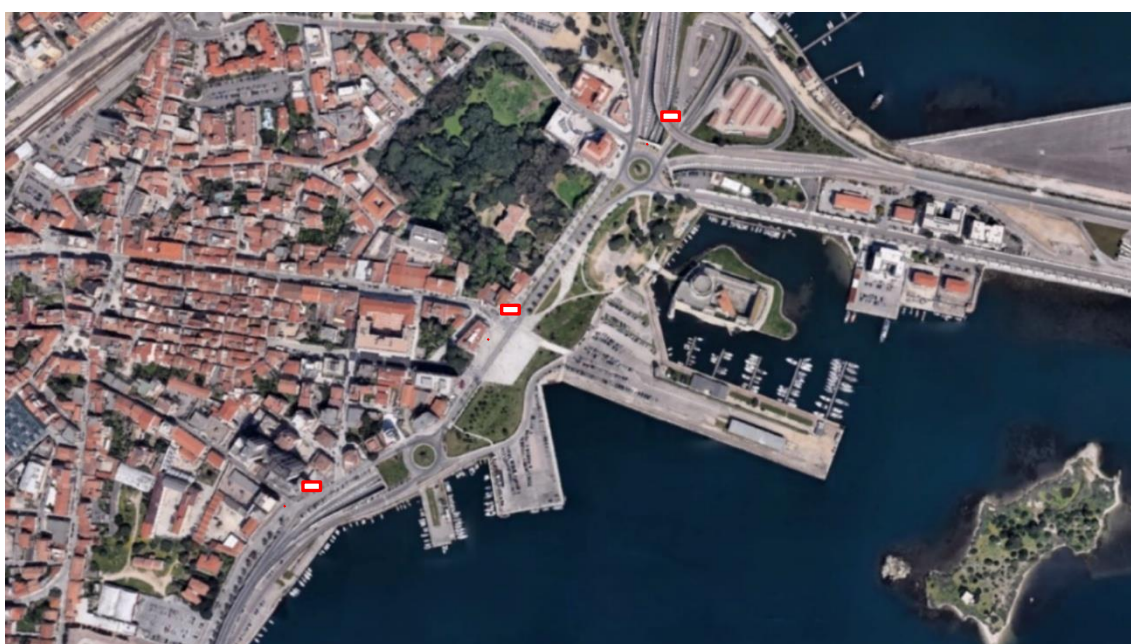


FIGURE II.2-POSITIONS DU RELEVÉ PHONOMETRIQUE SUR LES ORTHOPHOTOS

2.2 ENQUÊTES SUR LE BRUIT ET LA CIRCULATION

Cette section décrit les activités parallèles d'enquête sur le bruit et le trafic en conditions "ex-ante" pendant les périodes "douce" et "de pointe" prévues sur la base de l'analyse cognitive préliminaire.

2.2.1 Base de données du bruit et des flux de trafic (ex-ante) en période douce et en période de pointe

L'ensemble des informations acquises lors des deux campagnes de mesure distinctes a été structuré dans une base de données afin de développer une analyse approfondie du climat acoustique du front du port et de la cartographie acoustique de la zone en fonction des modèles de propagation physique.

La première campagne d'enquête "ex ante" a eu lieu en mars 2019, période de l'année identifiée comme "douce" au cours de laquelle l'activité est habituellement ordinaire

dans le port de voyageurs.

La deuxième campagne "ex ante" a été réalisée au mois d'août de la même année, période typique "de pointe" de la saison touristique avec une activité intense dans le port de passagers. Les enquêtes ont été réalisées aux mêmes points d'acquisition et pour les mêmes sections de route que dans la période douce.

2.2.2 Méthode d'exécution des mesures phonométriques

Les mesures phonométriques ont été effectuées conformément au décret ministériel 16/03/1998 "Techniques pour la détection et la mesure de la pollution sonore" pour les critères généraux et pour la position des microphones pour la détection du bruit du trafic pour l'intervalle de temps de la mesure. Pour les mesures, on a utilisé des instruments de classe 1, accompagnés de leurs certificats d'étalonnage valides, comme le prescrit le décret ministériel susmentionné. On a notamment utilisé des sonomètres intégrateurs Sound Level Meter 01dB Cube et des microphones pré-polarisés de type 1/2' G.R.A.S. 40CD.

Toutes les mesures phonométriques ont été effectuées avec des stations fixes installées à une hauteur de 4 mètres du niveau de la route selon une logique orientée vers la source (dont les caractéristiques sont décrites dans les directives ISPRA au paragraphe 5.1) et dans des conditions de surveillance afin de noter toute singularité ou anomalie générée par l'activité occasionnelle de sources acoustiques non-véhiculaires à proximité des points de mesure.

Pendant les mesures, les valeurs moyennes des grandeurs acoustiques suivantes ont été acquises et stockées sur des supports numériques, avec une base de temps de 100 [ms] : tendance temporelle du niveau de pression acoustique selon les différentes courbes de pondération des fréquences (A,B,C et linéaire), avec différentes pondérations temporelles (linéaire et exponentielle avec des constantes de temps Slow, Fast et Impulse).

Les chaînes de mesure du niveau de pression acoustique utilisées ont capturé et stocké des données physiques dans les domaines temporel et fréquentiel par bandes normalisées de 1/3 d'octave.

Afin de valider les mesures, les données météorologiques relatives aux intervalles de temps des mesures du bruit environnemental, telles que les valeurs de pluie, l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, la température, ont été enregistrées par une unité d'acquisition installée près des routes surveillées.¹

2.2.3 Mesures ex ante du bruit (période douce)

La campagne de mesure prévue a été réalisée les 25, 26, 27 et 28 mars 2019. Les mesures ont commencé dans la soirée du 25.03.2019 à 20h00 pour toutes les stations

¹ Station de détection installée dans le musée archéologique municipal

jusqu'à 18h00 le 28.03.2019 pour 3 TR de nuit et 3 TR de jour.



Position du microphone A

Position du microphone B

Position du microphone C

Position du microphone D

FIGURE II.3 – POSITIONS DE L'ENQUÊTE PHONOMÉTRIQUE EX ANTE DE LA CAMPAGNE SOFT PERIOD (MARS 2019)

En plus des positions d'étude "source orientée", pour une étude plus complète du climat acoustique, une station phonométrique intérieure a également été ajoutée (position de microphone D). L'installation d'acquisition a été placée en correspondance avec le récepteur "Municipio" directement en face de Via Principe Umberto, le tronçon routier soumis à l'enquête phonométrique et de flux de trafic..

2.2.4 Réalisation d'enquêtes phonométriques ex-ante (période de pointe)

La campagne de mesure en période de pointe, compte tenu de la saisonnalité marquée des flux liés à la saison touristique, a été programmée les jours où statistiquement ces dernières années, comme l'indique l'Autorité portuaire d'Olbia, le trafic de passagers dans le port commercial a été le plus important. Pour l'exécution des enquêtes ont donc été identifiés les jours 23, 24, 25 et 26 août 2019. Les relevés ont commencé l'après-midi du 23.08.2019 à 16h00 pour toutes les stations et se sont terminés à 18h00 le 26.08.2019 pour un total de 3 TR de nuit et 3 TR de jour relevés.

Les mesures ont été effectuées aux mêmes stations fixes engagées dans la période douce, avec les mêmes chaînes de mesure, afin d'évaluer spécifiquement comment la variation des volumes de trafic liés à la zone portuaire affecte le bruit environnemental près du front urbain.



Position du microphone A



Position du microphone B



Position du microphone C

FIGURE II.4 – STATIONS DE MESURE DU BRUIT CAMPAGNE EX ANTE PÉRIODE DE POINTE (AOÛT 2019)

2.2.5 Méthodes d'enquête sur les flux de trafic

Afin d'avoir une image aussi complète que possible des flux de trafic, 10 sections de route ont été identifiées pour réaliser les enquêtes.

Les activités d'enquête ont été réalisées en mode vidéo par l'acquisition continue d'images pendant une période de 72 heures. L'équipement permet de surveiller les deux directions simultanément. L'enquête sur les flux de trafic, synchronisée avec les enquêtes acoustiques, a donné le nombre de véhicules par direction divisé en 5 classes sur la base de la longueur



FIGURE II.5 – SECTIONS DE L'ENQUETE SUR LE FLUX DU TRAFIC

2.2.6 Enquêtes ex ante sur les flux de trafic pendant la période douce

Le rapport d'enquête contient, pour chaque section, le comptage des véhicules divisé par direction et par classe de véhicules, avec une référence à l'intervalle horaire et, en détail, à la minute.

Le graphique à barres de la section 3C de l'enquête, avec les contributions distinctes des différentes classes, est présenté ci-dessous à titre d'exemple.

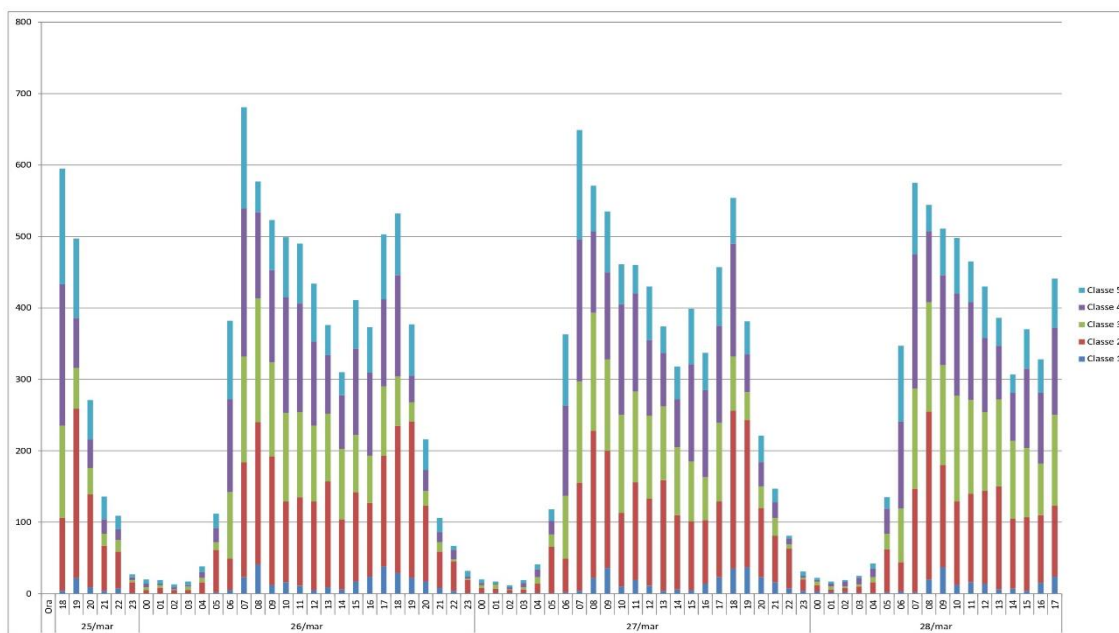


FIGURE II.6 – GRAPHIQUE GLOBAL CUMULATIF DES FLUX DE TRAFIC SECTION 3C DIR. 1 PERIODE DOUCE

2.2.7 Enquêtes ex ante sur les flux de trafic en période de pointe

Les enquêtes ont été réalisées sur les mêmes tronçons routiers analysés en période douce en mars 2019 afin d'avoir une image comparative des deux périodes et de la répartition différente des flux dans les créneaux horaires.

Toujours pour cette phase, le rapport d'enquête contient, pour chaque section, le nombre de véhicules répartis par direction et par classe de longueur. Par rapport aux enquêtes de la période douce (pour lesquelles les passages de véhicules étaient enregistrés toutes les minutes), en période de pointe, les passages de véhicules et leur vitesse instantanée étaient enregistrés toutes les secondes.

A titre d'exemple, le graphique à barres de la section d'enquête 3C avec les contributions cumulées des différentes classes est également montré pour cette période.

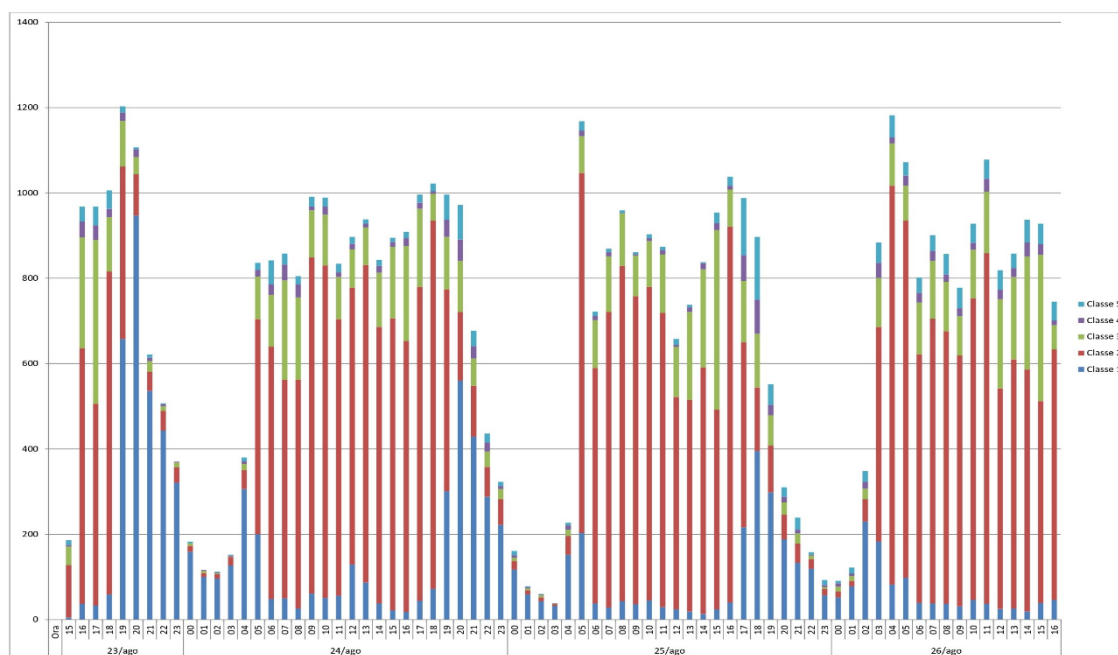


FIGURE II.7 – GRAPHIQUE GLOBAL CUMULE DES FLUX DE TRAFIC SECTION 3C DIR. 1 PERIODE DE POINTE

3. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU BRUIT DU TRAFIC (RÉSUMÉ DU RÉSULTAT T2.2.2)

3.1 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL DE PRÉVISION DES ÉMISSIONS SONORES

3.1.1 Développement d'un modèle prédictif trafic-bruit.

L'objectif de l'activité est de développer un modèle capable de prédire la valeur correcte du niveau de pression acoustique qui serait généré en un point donné en correspondance avec un scénario assigné de composition et de disposition du trafic de véhicules sur les sections de route qui ont été étudiées expérimentalement.

Le modèle est basé sur les acquisitions de l'événement de bruit, sans nécessairement avoir toutes les réalisations possibles avec lesquelles ce phénomène peut se manifester. Afin d'atteindre l'objectif de fournir des prédictions correctes sur l'ensemble de l'univers d'intérêt à partir de la connaissance partielle du phénomène, un système de reconnaissance basé sur l'apprentissage d'un réseau de neurones a été utilisé (Lecun et al., 2015 ; Schmidhuber, 2015). Un tel système de reconnaissance est abordé en raison de sa capacité à généraliser les résultats et donc à associer la réponse correcte également à des signaux d'entrée qui n'ont pas été (jamais explicitement) envisagés auparavant, ou à des informations manquantes ou partiellement compromises (Erhan et al., 2014).

Dans la mise en œuvre d'un modèle basé sur les réseaux neuronaux, on peut typiquement identifier les procédures suivantes.

- Training procedure, procédure d'entraînement dans laquelle le réseau est soumis à l'adaptation de ses paramètres internes dans le but d'apprendre un certain nombre de cas qui constituent l'ensemble d'entraînement, identifié parmi quelques réalisations expérimentales des événements bruyants qui ont été mesurés pendant toute la période de mesure..
- Testing procedure, qui permet de vérifier et de quantifier la capacité d'apprentissage atteinte par le réseau en termes de capacité à reconnaître correctement le plus grand nombre de configurations des événements bruyants appartenant à l'ensemble d'apprentissage (utilisé pendant la phase d'apprentissage) et à étendre la reconnaissance correcte également aux cas, appelés ensembles de test, qui n'ont pas été envisagés précédemment dans l'ensemble d'apprentissage.
- Normalizing procedure, dans laquelle l'ensemble des données expérimentales du flux de véhicules est préalablement soumis à une normalisation afin d'éviter que les valeurs maximales et minimales de l'ensemble de test, qui dépassent les valeurs maximales et minimales de l'ensemble d'apprentissage, ne provoquent la saturation de la fonction de transfert du réseau.

Le modèle a été mis en œuvre avec l'acquisition de relevés de trafic et de bruit pendant les périodes de mesure 25-28 mars et 23-26 août 2019 structurés en séries avec une résolution temporelle toutes les 60 secondes.

L'architecture de réseau neuronal "Time series predictions", identifiant initialement comme domaine de sortie la tendance temporelle de la pression acoustique et adoptant la stratégie d'apprentissage "single time span", a fourni les meilleurs résultats qualitatifs dans la phase de généralisation. La méthodologie prévoit pour la phase d'entraînement un seul intervalle de temps continu d'une durée adéquate dans la période de mesure, tandis que les instants exclus de l'intervalle d'entraînement sont pris en compte pour la deuxième phase de validation-test.

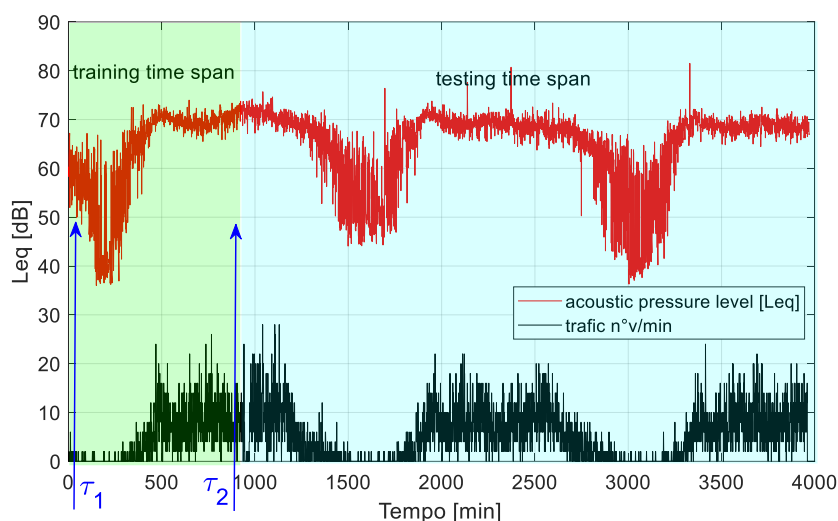


FIGURE II.8 TENDANCE DE LA CIRCULATION DES VEHICULES ET DU BRUIT DETECTE. LES PERIODES AUXQUELLES SE REFERENT LES DONNEES CONSIDEREES POUR L'ENSEMBLE D'APPRENTISSAGE ET L'ENSEMBLE DE TEST AVEC LA DEUXIEME STRATEGIE SONT MISES EN EVIDENCE.

3.1.2 Résultats du modèle neuronal

Une comparaison entre les quantités suivantes a été effectuée :

la valeur simulée par le modèle neuronal en réponse à la réalisation de trafic générique qui s'est produite pendant le i-ème intervalle

la valeur expérimentale qui a été mesurée pendant le même i-ème intervalle.

L'évolution de l'erreur entre les deux quantités est représentée Figure II.9. Comme on peut l'observer, l'erreur est maintenue en dessous de 1 dB sur toute la durée de la mesure par rapport à la phase de test.

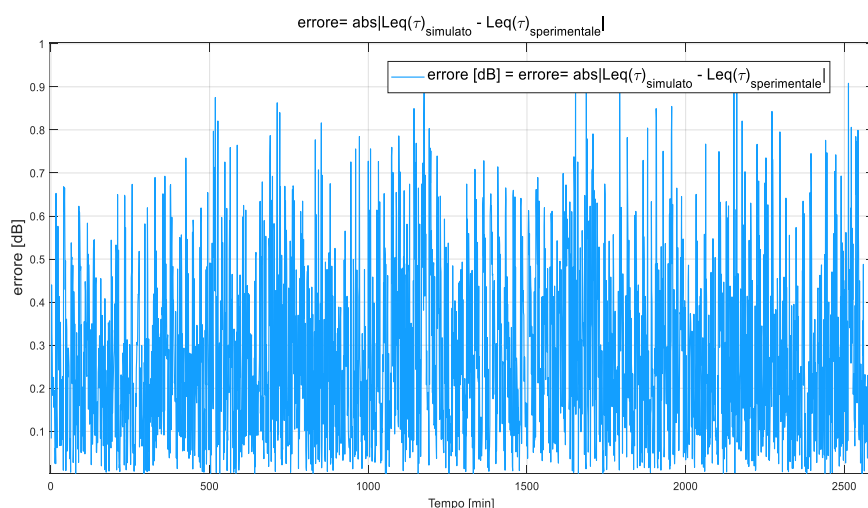


FIGURE II.9 ERREUR PENDANT LA PHASE D'ESSAI ENTRE LES VALEURS MESUREES ET LES VALEURS SIMULEES PAR LE MODELE.

Les figures II.10 et II.11 ci-dessous montrent les comparaisons entre les évolutions temporelles du niveau de pression acoustique mesuré expérimentalement et celui

prédit dans la phase de simulation par le modèle neuronal. Les résultats obtenus en termes d'adhérence des valeurs prédites aux valeurs expérimentales sont valables et extensibles pour toutes les valeurs de la time line et pas seulement pour celles indiquées dans les figures.

Afin d'optimiser et d'améliorer les résultats du processus d'entraînement, une campagne d'entraînement progressive a été développée, grâce à laquelle il a été possible de déterminer la sensibilité et la robustesse du modèle aux données d'entrée fournies par les différentes sections de route de la campagne de mesure. Cette procédure a permis d'identifier un ensemble de données canonique formé par un nombre minimum de tronçons de route représentant les sources spécifiques qui déterminent les fluctuations du climat acoustique, à proximité de chaque station de mesure phonométrique.

À titre d'exemple, les résultats de l'emplacement phonométrique A (rond-point du Sacro Cuore, mars-août 2019) sont brièvement rapportés. Afin de rendre plus efficace l'apprentissage du réseau neuronal qui estime la réponse détectable, on a considéré l'ensemble optimisé suivant de sections d'étude du trafic qui fournit la meilleure contribution aux performances dans la phase de formation et de généralisation, c'est-à-dire les sections 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F..

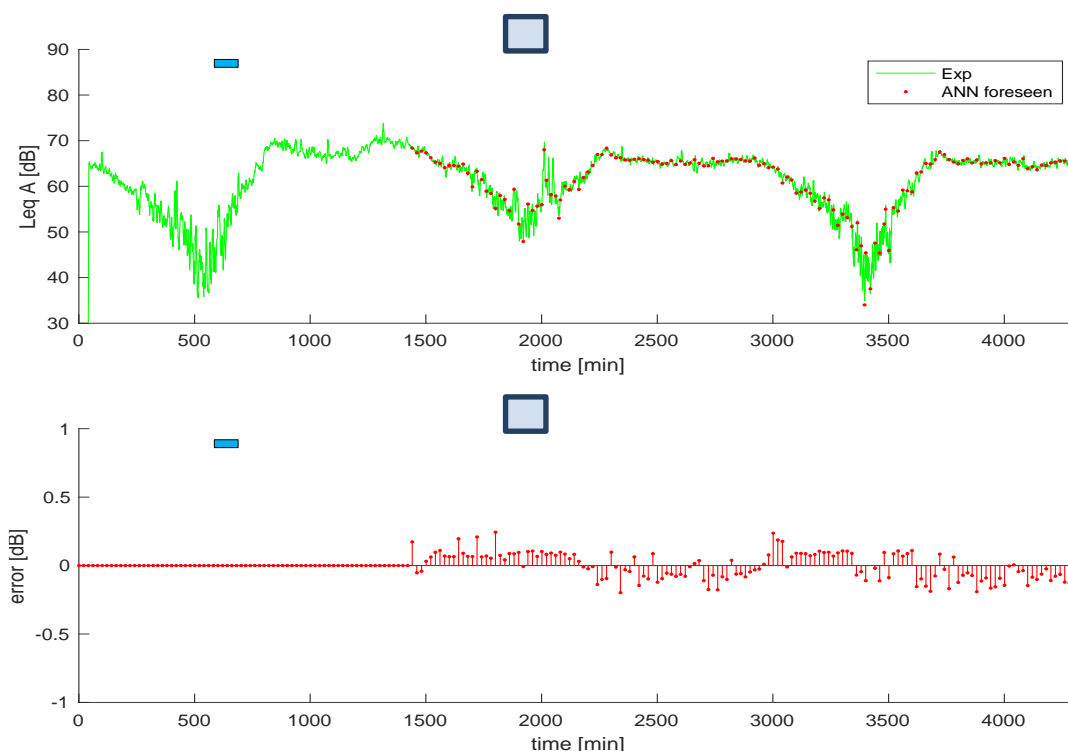


FIGURE II.10 - LEQA ACQUIS EXPERIMENTALEMENT (VERT) ET PREDIT PAR ANN (POINTS ROUGES), EN HAUT. DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS CALCULEES ET EXPERIMENTALES, EN BAS. EMPLACEMENT DE LA PERIODE DOUCE 25-28MARS 2019.

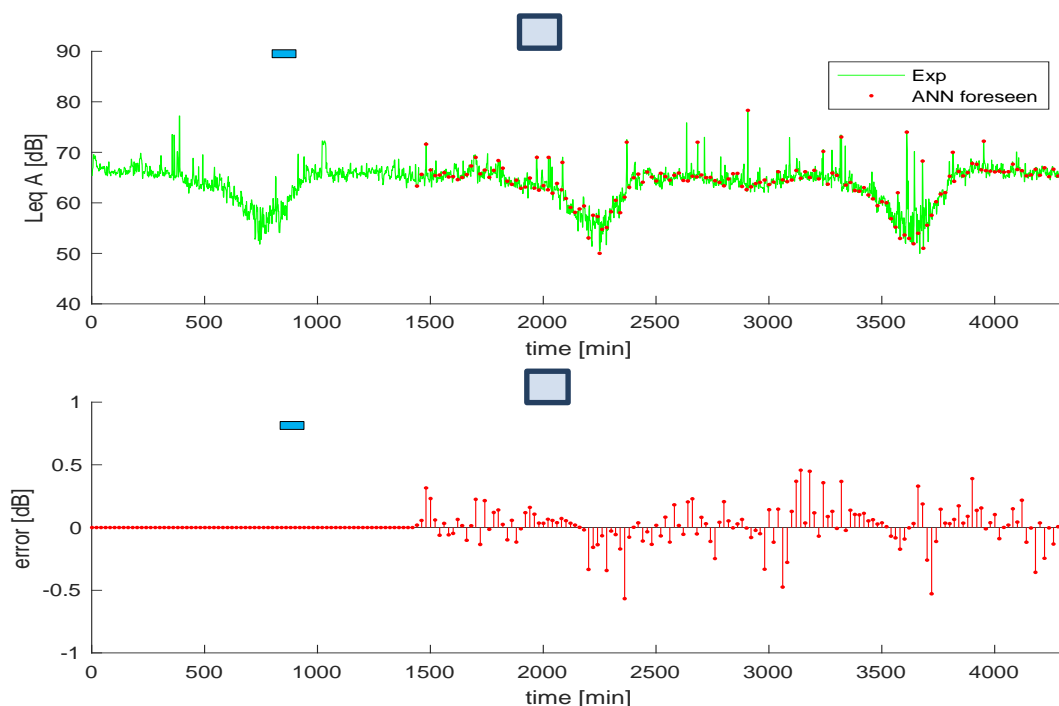


FIGURE II.11 - LEQA ACQUIS EXPERIMENTALEMENT (VERT) ET PREDIT PAR ANN (POINTS ROUGES), EN HAUT. DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS CALCULEES ET EXPERIMENTALES, EN BAS. PERIODE DE POINTE DU 23 AU 26 AOUT

3.1.3 Considérations sur les résultats obtenus et les conclusions

Le modèle de trafic présente une très bonne capacité de prédiction du climat acoustique généré par le trafic automobile aux trois emplacements de mesure du bruit. L'entraînement du modèle neuronal a été basé sur un segment de temps constitué des 1400 premières minutes, tandis que les 2600 minutes restantes ont été exclues de la procédure d'entraînement et ont donc été réservées à la vérification des performances du réseau dans la phase de généralisation. Cette phase de généralisation permet de vérifier si le réseau est uniquement capable de fournir des valeurs correctes pour les niveaux de bruit lorsqu'il reçoit des configurations de trafic "déjà vues" ou s'il est capable d'étendre sa capacité à de nouveaux scénarios de trafic.

La capacité de généralisation pendant toutes les périodes de référence du jour, du soir et de la nuit est très bonne. Le modèle a pu prédire des valeurs de Leq,A adhérant aux valeurs mesurées expérimentalement, tant lorsque le signal acquis était quasi-stationnaire que dans des conditions de forte variabilité.

L'erreur absolue est toujours bien inférieure à la valeur de 1 décibel tout au long de la "ligne de temps" de la campagne de mesure. En particulier, en ce qui concerne la station de mesure en position A, pour laquelle les résultats ont été rapportés à titre d'exemple, les résultats suivants peuvent être résumés:

Période douce (Figure II .10)

- **segment de temps de la phase d'apprentissage:** l'écart entre les données expérimentales et les valeurs simulées est pratiquement nul.
- **-segment de temps de la phase de génération des tests:** l'écart entre les données expérimentales et les valeurs simulées est partout inférieur à un demi-décibel..

Période de pointe (figure II .11):

- **segment de temps de la phase d'apprentissage :** l'écart entre les données expérimentales et les valeurs simulées est pratiquement nul.
- **segment de temps de la phase de génération des tests :** l'écart entre les données expérimentales et les valeurs simulées est partout inférieur à un demi-décibel, sauf à deux reprises où il est légèrement supérieur à un demi-décibel..

Bien que les résultats fournis par le modèle soient respectés de manière satisfaisante pour les trois sites et pour les deux périodes de référence, il convient de noter une légère dégradation des performances du modèle dans sa capacité à prédire les tendances en période de pointe à tous les sites. Cette situation était prévisible et peut être raisonnablement expliquée par une augmentation significative de l'activité anthropique pendant la période de pointe du mois d'août, au cours de laquelle les effets d'autres sources de bruit se superposent inévitablement au bruit de la circulation automobile, en particulier le soir, lorsque la dégradation des performances est observée..

3.2 LA CONSTRUCTION DU MODÈLE DE TRAFIC AVEC LE LOGICIEL SUMO

Ce paragraphe définit le processus méthodologique et les résultats obtenus de la construction du modèle de trafic développé avec le logiciel SUMO dans le réseau routier de la ville d'Olbia et en particulier pour la simulation de l'état actuel du trafic sur le front de mer du port pendant les périodes douces et de pointe. Le modèle, une fois calibré, permet, par rapport à des scénarios hypothétiques de trafic déterminés aux heures de pointe d'embarquement et de débarquement des navires de passagers dans le port d'Olbia, d'évaluer les flux de trafic (dans ses composantes caractéristiques) sur les différents tronçons du réseau routier. Ces flux constitueront les données d'entrée du modèle prédictif de bruit du trafic développé avec des réseaux neuronaux. L'étude qui est illustrée concerne

- l'analyse des flux de mobilité actuels, grâce à l'étude de tronçons de route et d'intersections ;
- la construction du modèle de simulation de trafic sur la base des données d'enquête sur l'état actuel en période de pointe et en période creuse de 2019.

3.2.1 Enquêtes sur la circulation des véhicules

Pour l'analyse des flux de véhicules dans la zone examinée, 15 sections d'enquête et 8 intersections ont été installées, dont la position est indiquée dans la Figure II.12

Le Table II.2 donne des détails sur la localisation des sites d'enquête.

Identifiant	Localisation
Sec. 1	Via Banchina Isola Bianca_direction Olbia centre
Sec. 1'	Via Banchina Isola Bianca_direction Port
Sec. 2	Viale Isola Bianca
Sec. 3	SS 125
Sec. 4	Circonvallazione 3 Olbia
Sec. 5	SS 131 DCN Accès sud - Direction nord
Sec. 5'	SS 131 DCN Accès sud - Direction sud
Sec. 6	SS 597 Logudoro
Sec. 7	SS 127 Settentrionale Sarda
Sec. 8	Circonvallazione 1 Olbia
Sec. 9	SS 125 Accès Nord
Sec. 10	Viale Principe Umberto
Sez. 11	Via. Poltu Ezzu
Sez. 12	E840 Accès Olbia
Sez. 13	Via. Poltu Ezzu
Inters. 1	Viale Principe Umberto-SS 125 - Via Isola di Mezzo
Inters. 2	Viale Principe Umberto- Via Genova- Via Poltu Ezzu
Inters. 3	Via Redipuglia- Via Roma-v. Iglesias
Inters. 4	SS 127 nord-SS 127 sud- Via Venafiorita
Inters. 5	Via D' Annunzio- Via dei Lidi
Inters. 6	Passage à niveau Via D' Annunzio- Via Aldo Moro- Via Nanni
Inters. 7	Passage à niveau Corso Umberto I- Via S. Sepolcro - Corso V. Veneto- Via Mameli
Inters. 8	Via Re di Puglia- Via Regina Elena- Via Nuoro

TABLE II.2 LOCALISATION DES SECTIONS D'ENQUETE

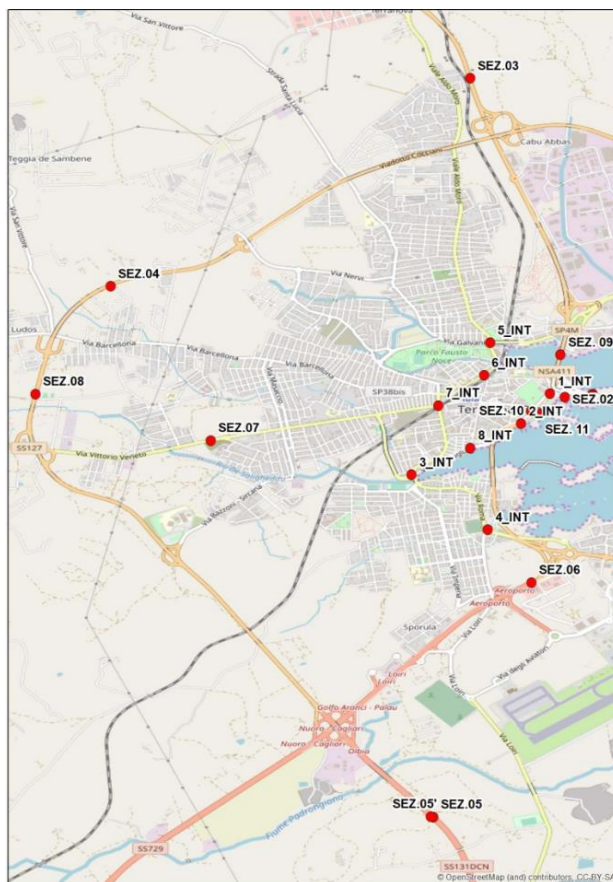


FIGURE II.12 – LOCALISATION DES SECTIONS D'ENQUETE

Dans les sections, les flux de trafic ont été réalisés dans un intervalle de 24 heures, tandis qu'aux intersections, les manœuvres détectées aux heures de pointe du matin et du soir (7h30-9h00, 17h30-19h00) ont été prises en compte. L'analyse a été réalisée en divisant les véhicules en trois catégories:

- les véhicules légers;
- les véhicules lourds;
- les motos.

Les données suivantes sont stockées dans la documentation étendue du projet

3.2.1.1 Enquêtes par section

Pendant la période d'automne, 181 411 véhicules par jour ont été contrôlés, soit 29 % de moins que pendant la période d'été (258 725 véhicules par jour). Cette diminution est plus prononcée dans les sections 1-1', où elle atteint 52%. Dans les sections 3 et 5-5', on constate une diminution de 44 ÷ 46% ; dans la section 2, le pourcentage de véhicules/j contrôlés pendant la période d'automne est inférieur de 39% à celui de la période d'été, tandis que dans les sections 4, 6 et 12, la diminution est de 29%. Dans les autres sections, la diminution est inférieure à 29%, la valeur la plus faible étant celle de la section 11 (-12%). La section 9 présente le plus grand nombre de véhicules détectés

dans les deux périodes d'analyse (14%). Le nombre le plus faible de véhicules passant par les périodes d'automne et d'été se trouve dans la section 2, où le pourcentage de véhicules détectés par rapport à la valeur totale est légèrement supérieur à 1%. La figure II.13 illustre graphiquement la comparaison entre les deux périodes d'analyse.

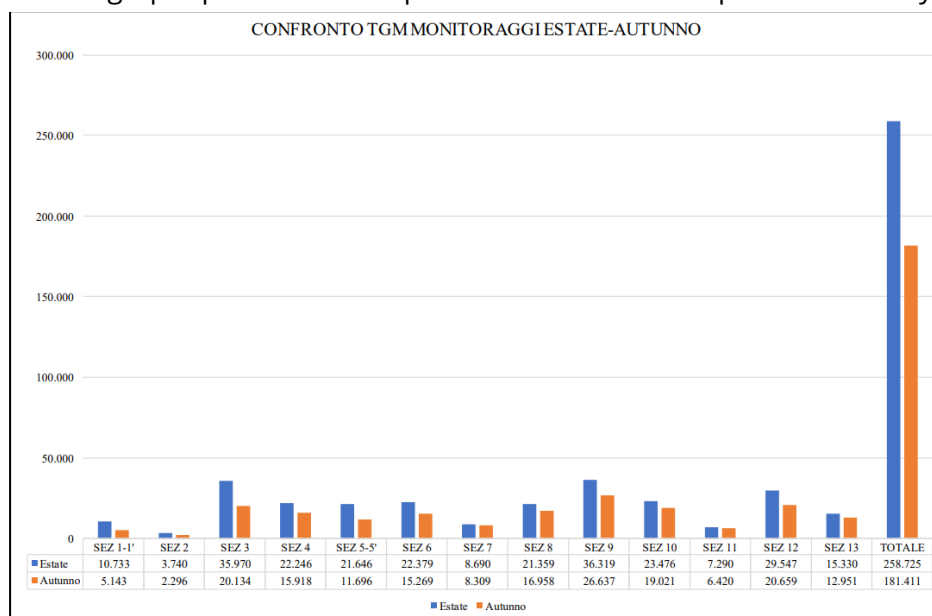


FIGURE II.13 - COMPARAISON ETE-AUTOMNE DES 13 SECTIONS DE SURVEILLANCE

Les deux périodes de référence présentent des tendances similaires, avec deux pics correspondant aux heures de pointe. Alors qu'en été, l'heure de pointe du matin se situe entre 9h00 et 10h00 avec 17 452 vei/h, en automne, elle se situe dans la tranche horaire entre 8h00 et 9h00 avec une valeur de 16 536 vei/h (-6%). En ce qui concerne l'heure de pointe du soir, en été, elle se produit dans la tranche horaire entre 18h00 et 19h00 avec 18.627 vei/h, tandis qu'en automne, elle se produit dans une période de deux heures, de 17h00 à 19h00 avec environ 14.300 vei/h (-23%).

3.2.1.2 Enquêtes aux intersections

Le suivi du flux de véhicules passant par les 8 intersections examinées a été effectué dans deux créneaux horaires distincts :

- 7:30- 9:00
- 17:30- 19:00

Dans la tranche horaire du matin, un total de 18 309 véhicules a été compté pendant la période estivale et 18 859 pendant l'automne, soit une différence de 3%. Dans la tranche horaire du soir, 19 980 véhicules sont passés pendant la période estivale et 20 809 pendant l'automne, soit une différence de 4%.

3.2.2 Le modèle de simulation

Une fois le zonage de la zone d'étude effectué, les arcs représentatifs des infrastructures routières les plus importantes ont été construits, en associant à chacun d'eux des

informations sur les principales caractéristiques et, par la suite, la matrice Origine/Destination² a été élaborée. Le graphique du réseau a ensuite été chargé dans le logiciel de simulation de système de trafic SUMO (package NetEdit). Les intervalles de temps sur lesquels l'analyse a été développée étaient, pour les périodes d'été et d'automne, les suivants:

- Matin : 7h30-9h00
- Soirée : 17h30-19h00

Une fois la matrice O/D construite, elle a été corrigée sur la base des flux détectés, à l'aide du package Marouter, qui réalise une affectation d'équilibre stochastique de manière itérative. L'affectation stochastique des charges du réseau, effectuée à chaque itération, est basée sur un modèle logit modifié (proposé par Lohse). Marouter fournit en sortie le fichier - olbia.netload.xml qui contient les flux, les temps de parcours moyens et le degré de saturation de chaque arc du graphe, ainsi que le fichier avec l'extension olbia.routemarouter.xml qui contient toutes les routes utilisées pour joindre chaque paire O/D des arcs couverts par chaque route. Une fois la matrice O/D corrigée, les flux obtenus par l'affectation d'équilibre ont été utilisés pour calculer le niveau de service de chaque arc routier, en analysant les retards et les flux de transit. Enfin, une affectation dynamique a été réalisée, en utilisant le paquet Duaiterate pour simuler les interactions directes entre les véhicules dans le réseau d'Olbia et leur variation, avec la modification conséquente des niveaux de service routier, en fonction du temps.

3.2.3 Les résultats du modèle à l'équilibre

Afin d'analyser les résultats obtenus à partir de l'affectation à l'équilibre, une valeur de vitesse horaire moyenne de 10 km/h a été fixée comme seuil d'identification des conditions de congestion du trafic. On a ensuite obtenu les flux de trafic exprimés en véhicules/heure aux heures de pointe du matin et du soir se rapportant aux périodes d'été et d'hiver.

Le tableau montre les arcs affectés par la congestion, en les différenciant sur la base de la période pendant laquelle le phénomène a lieu. Le tableau II.3, en revanche, fournit des données macroéconomiques sur les simulations effectuées, en indiquant le pourcentage des arcs dans lesquels la limite de capacité est dépassée avec la congestion conséquente et la valeur moyenne du rapport débit/capacité (saturation) de ceux-ci.

²Elaborazione basata sui dati della matrice O/D ISTAT 2011

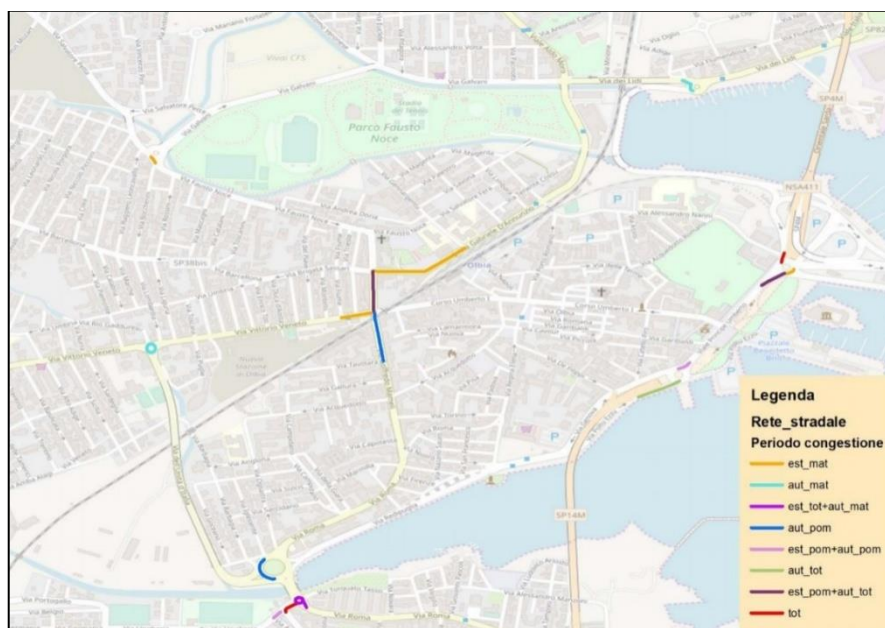


FIGURE II.14 - ARCS ENCOMBRES

Simulazione	Percentuale archi con superamento del limite di capacità	Rapporto flusso/capacità medio
Estate mattina	16%	55%
Estate pomeriggio	9,4%	59%
Autunno mattina	8,5%	56%
Autunno pomeriggio	9,9%	59%

TABLE II.3 - CARACTERISTIQUES MACRO DES SIMULATIONS

3.2.4 Résultats du modèle dynamique

L'affectation dynamique intra-période a été réalisée à l'aide du logiciel Duaiterate. L'algorithme de routage utilisé par défaut dans Dualterate est l'algorithme de Gawron : chaque véhicule est affecté à l'itinéraire le moins coûteux, mais celui-ci est mis à jour de manière itérative en fonction des conditions de circulation. 1 000 itérations ont été effectuées pour chaque simulation. Cela a permis d'obtenir un scénario final de simulation dynamique bien défini, avec des files d'attente et des ralentissements très similaires à ceux obtenus par le modèle d'équilibre. Pour vérifier la similitude entre les deux simulations, une comparaison a été faite entre les deux vecteurs obtenus à partir de l'affectation d'équilibre probabiliste, feq (paquet Marouter) et de l'affectation dynamique, fdin (paquet Duaiterate). Les deux indices RMSE% et DIFFP ci-dessous ont été utilisés à cette fin:

$$RMSE\% = \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{n_a} \cdot \sum_{i=1}^{n_a} (f_{eq,i} - f_{din,i})^2}}{\frac{1}{n_a} \cdot \sum_{i=1}^{n_a} f_{din,i}} \right] \cdot 100$$

$$DIFFP\% = \left[\sum_{i=1}^{n_a} \frac{|f_{eq,i} - f_{din,i}|}{f_{din,i}} \cdot \frac{f_{din,i}}{S} \right] \cdot 100$$

Où :

$f_{eq,i}$ = flux sur le i-ème arc obtenu par affectation d'équilibre

$f_{din,i}$ = flux sur le i-ème arc obtenu par affectation dynamique

n_a = nombre d'arcs dans le réseau

$$S = \sum_{i=1}^{n_a} f_{din,i}$$

Les calculs effectués aboutissent aux valeurs suivantes pour les indices RMSE% et DIFFP% : RMSE% = 10,45% DIFFP% = 6,41%.

Ce résultat, notamment pour l'indice DIFFP, qui pondère chaque écart sur la quantité de flux passant effectivement par l'arc, indique que les deux modèles (équilibre et dynamique) sont parfaitement alignés.

3.2.5 Analyse des flux de courant

La présente analyse des flux est fonction des scénarios alternatifs possibles de réorganisation du trafic à partir des évaluations faites précédemment et en considérant l'invariance des dimensions des infrastructures routières d'accès/de sortie du Port. Sur la base de ces considérations, les points critiques du réseau ont été identifiés par la modélisation avec le logiciel SUMO de l'état actuel et représentés dans la Figure II .15.

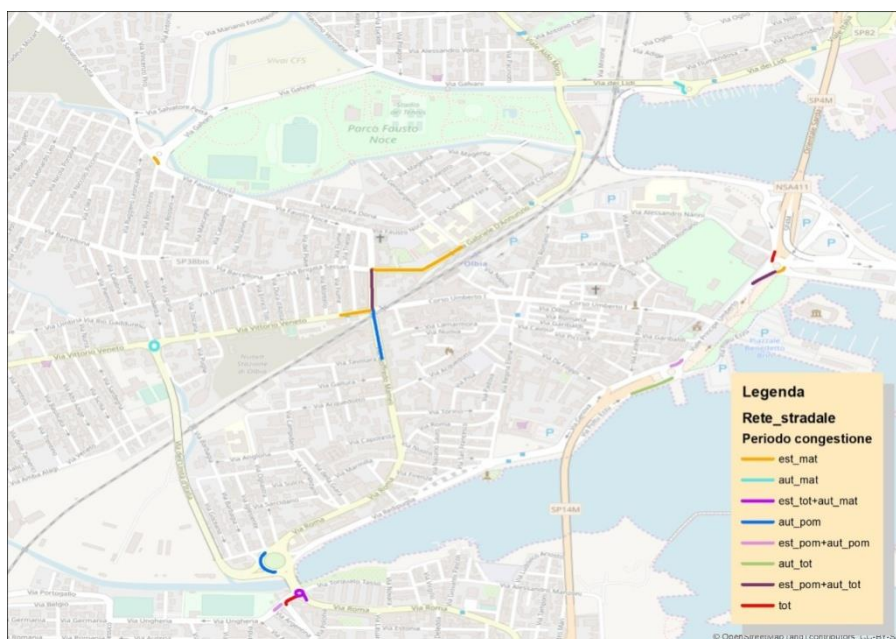


FIGURE II.15 - ZONES DE PLUS GRANDE CONGESTION

Sur cette figure, on peut voir que les phénomènes de congestion les plus importants se produisent sur le réseau routier interne et sur la route d'accès au port depuis la zone sud (voir la boîte noire sur la figure).

Pour vérifier davantage les points critiques du réseau routier, à partir des relevés effectués et illustrés dans les paragraphes précédents, les flux ont été extraits sur les différentes sections du réseau routier d'intérêt et en particulier sur la route du front de mer du port.

En utilisant les sections 05 et 03 comme référence, la quantité et le type de flux bidirectionnels d'accès/de sortie de l'arrière-pays sud et du nord d'Olbia ont été vérifiés.

Sezione	Tipo traffico	Periodo			
		Estate: 8-9	Estate: 18-19	Autunno: 8-9	Autunno: 18-19
05	Leggero	1.488	1.703	814	855
	Pesante	73	61	78	45
	Moto	15	20	0	3
03	Leggero	1.988	2.429	1.235	1.667
	Pesante	71	31	65	17
	Moto	17	33	8	7

TABLE II.4 - FLUX DETECTES DANS LES DEUX SECTIONS D'ACCES/DE SORTIE LES PLUS IMPORTANTES DE LA ZONE URBAINE D'OLBIA

L'analyse des flux présentée au tableau II.4 montre que les flux de véhicules légers en provenance du nord sont environ 33 % plus élevés que les flux en provenance du sud,

tandis que les flux de véhicules lourds sont généralement plus élevés que ceux en provenance du sud.

L'analyse des élaborations avec le modèle de simulation du trafic a révélé la possibilité d'une congestion le long de la route d'accès au port, étant donné que les flux en provenance du nord ne voient que la confluence d'un minimum de transits de Viale Italia/SP82 alors que les flux en provenance du sud voient la confluence de flux en provenance de Sassari et, sur la route du port, de flux en provenance du sud et de la SS125..

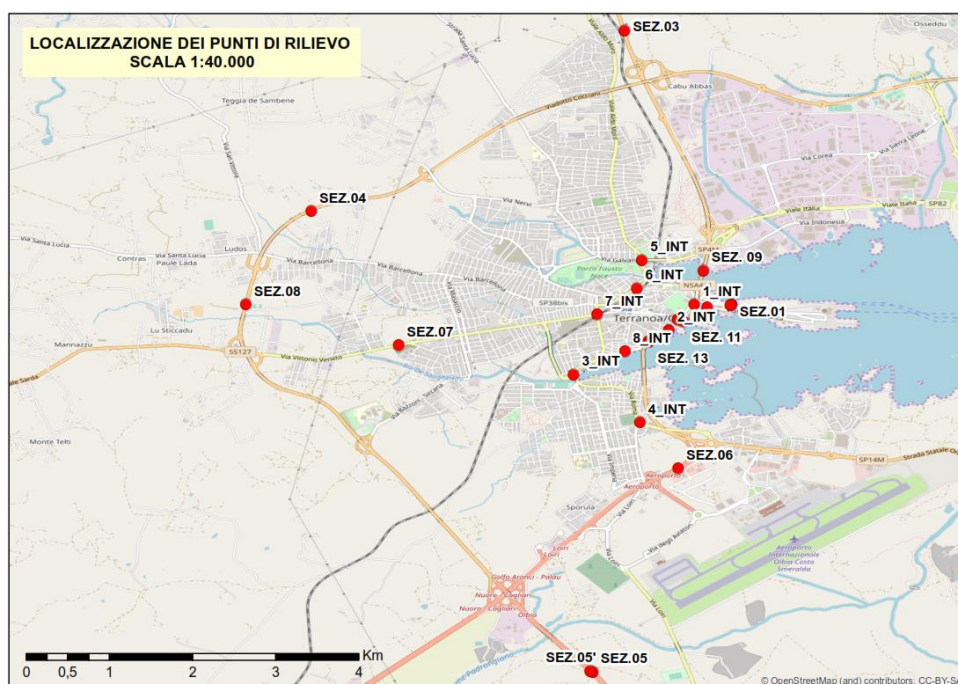


FIGURE II.16: POINTS DE SURVEILLANCE DU TRAFIC SUR LE RESEAU ROUTIER FONDAMENTAL D'OLBIA

Afin d'évaluer l'entité des niveaux de congestion sur le réseau routier, les résultats produits par le modèle de simulation de trafic dans la période été/automne ont été analysés pour déterminer l'entité des flux sur le réseau de la ville d'Olbia. Pour réaliser cette évaluation, on a repris les données du fichier NetLoad produit par Sumo à l'aide de la commande Marouter, ce qui a permis de vérifier les flux d'accès au port attribués par le calibrage en certains points du réseau routier, indiqués dans la figure II.18 ci-dessous et dans le tableau II.5 (élaboré selon le processus développé au point 3.2.2)..

Sezione	Periodo di simulazione			
	Estate: 8-9	Estate: 18-19	Autunno: 8-9	Autunno: 18-19
1	751	583	845	365
2	718	625	792	615
3	1.186	1.319	1.422	1.436

4	703	1.135	554	1.123
5	686	1.041	559	1.019

TABLE II.5 - LES FLUX SIMULES AUX POINTS INDIQUE DANS LA FIGURE II



FIGURE II.17 - POINTS DE VERIFICATION DU NIVEAU DE CONGESTION ROUTIERE

Comme on peut le voir dans le tableau II.5 ci-dessus, la plus grande partie des flux d'accès au port se trouve dans la section 3, à chaque période de l'année. Il ressort de ces données qu'il est nécessaire d'insérer des systèmes d'information sur la mobilité pour les flux de véhicules provenant du côté sud de la ville d'Olbia. En particulier, les informations sur l'état de congestion des entrées de la ville d'Olbia et du port devraient être adressées aux composantes lourdes du trafic véhiculaire, les plus responsables de la congestion urbaine, afin de décongestionner le nœud 3 qui, aux heures de pointe, est particulièrement critique.

3.2.6 Accidents

Les données d'accidents des années 2014-2018 ont été analysées en comparant les voies d'accès du nord et du sud au port sur les différents itinéraires et il est évident que les flux en provenance du sud impliquent un nombre plus élevé d'accidents, en particulier sur le tronçon côtier de la SS125.

Cet élément supplémentaire permet de certifier qu'il est approprié d'installer un PMV qui redirige les flux de véhicules arrivant/départant au Port depuis la direction sud.

3.3 CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS DE RÉORGANISATION DE LA CIRCULATION AVEC DES SYSTÈMES D'INFO-MOBILITÉ

Dans ce paragraphe, l'analyse des scénarios alternatifs possibles de réorganisation du trafic est illustrée en partant de la considération préliminaire que les dimensions et les alternatives possibles des voies d'accès/de sortie vers/depuis le port sont invariables. Par rapport à cette hypothèse préliminaire, à partir des résultats de la micro-simulation de l'ensemble du système routier principal d'Olbia et des données de l'enquête sur les flux réalisée en une semaine pendant la période estivale et automnale de 2019 sur treize tronçons routiers et huit intersections, on analyse d'abord les niveaux de congestion, d'accidentalité et de possibilité de réacheminement dans les différentes branches d'accès/de sortie du port.

L'analyse illustrée dans les paragraphes précédents a montré que les niveaux de congestion les plus élevés se produisent sur les branches venant du sud et, par conséquent, afin de réduire les charges de trafic qui encombrant ces artères principales, il a été évalué, comme défini dans l'introduction générale de cette étude, la rationalisation des flux de véhicules par l'utilisation de l'information des utilisateurs avec un système de panneaux à messages variables-PMV..

3.3.1 PANNEAUX À MESSAGES VARIABLES

3.3.1.1 *Les PMV actuellement présents sur le territoire communal*

Le premier est situé sur le côté droit du quai de l'Isola Bianca, en sortant du port (voir figure II .19) et le second est situé près du rond-point à l'intersection de la SS125, de la Via Mestre et de la Via dei Mercanti (voir figure II .20). Si le premier est très utile et indispensable pour informer les flux sortant du Port, le second est important car il informe ceux qui arrivent au Port depuis la zone sud, par la route côtière.

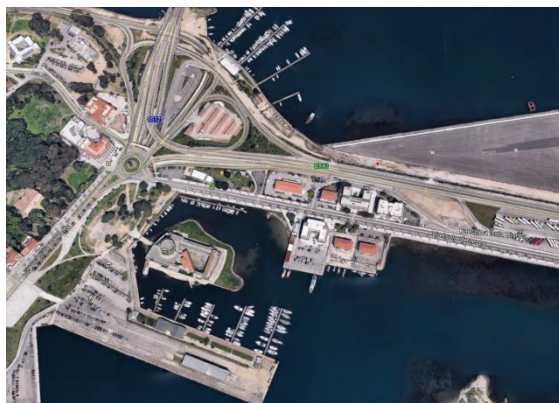


FIGURE II.18– LE PMV EXISTANT PRES DE LA PORT -
EMPLACEMENT GENERAL



FIGURE II.19 LE PMV EXISTANT DANS L'ACCES COTIER SUD
DU PORT - EMBLEMMENT GENERAL

Le système d'info-mobilité prévu dans le projet devra exploiter ces deux PMV et les

intégrer avec d'autres pour compléter le système de gestion et de réacheminement des flux de véhicules dans la municipalité d'Olbia..

3.3.1.2 *Les deux nouveaux PMV*

Des analyses décrites ci-dessus, il ressort qu'il convient de favoriser la localisation des systèmes d'info-mobilité avec PMV dans la partie sud de la ville d'Olbia et en particulier dans les points du réseau routier indiqués dans la figure II.22. Ces PMV sont destinés à fournir des informations d'info-mobilité aux véhicules venant de Sassari, via la SS729 (PMV n.1) et aux véhicules venant du sud via la SS 131 dcn (PMV n. 2).

Les figures suivantes montrent les emplacements des deux PMV sur le réseau routier menant à Olbia..

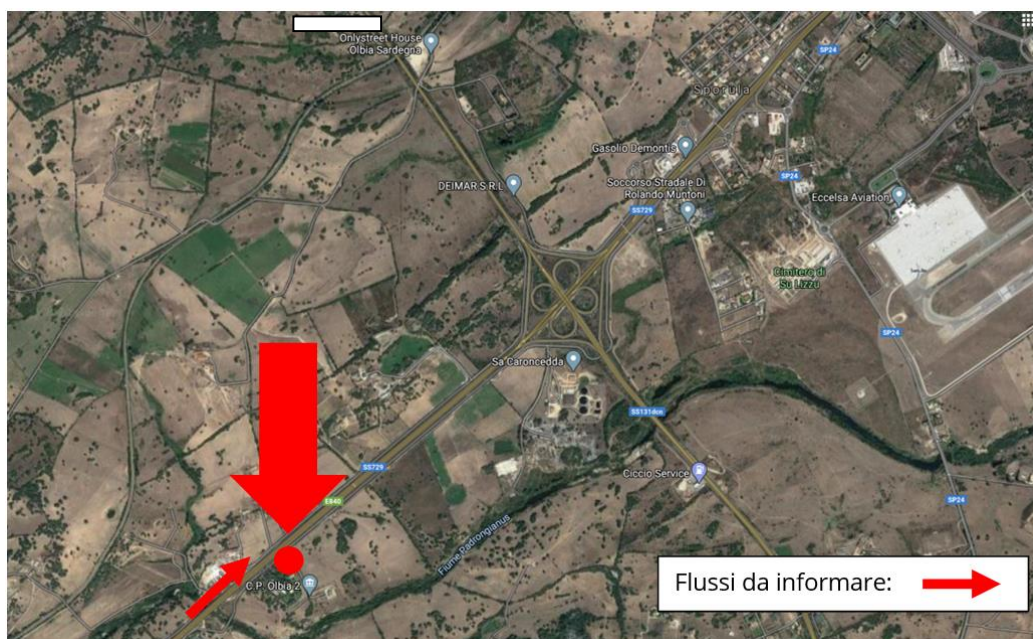


FIGURE II.20 – LE NOUVEAU PMV NO.1 - LOCALISATION GENERALE



FIGURE II.21 – IL LE NOUVEAU PMV NO.2 - LOCALISATION GENERALE

3.3.2 SCÉNARIOS DE GESTION DU TRAFIC

Avec la définition de la localisation de la position des PMV, voici une illustration de la gestion et de l'identification des scénarios de rationalisation du trafic à travers la plateforme ITS pour la gestion de la messagerie avec les PMV. Le système devra indiquer la position des PMV par rapport à des événements programmés (concomitance de plusieurs embarquements/débarquements simultanés de navires, maintenance et interventions sur le réseau routier, etc.), ou soudains (accidents sur le réseau routier menant au port, congestion temporaire des routes, etc.)

Les messages d'information sur la mobilité transmis par les PMV peuvent être intégrés à d'autres outils d'information des utilisateurs, tels que des applications spécifiques ou des services web.

Avec ce système, en relation avec les considérations illustrées ci-dessus, il est possible d'envisager de nombreux scénarios d'info-mobilité et d'intervention sur le réacheminement des véhicules à travers des messages à envoyer par les PMV. Plus précisément, ces messages peuvent concerner le réacheminement des véhicules selon les types suivants:

TYPE 1 - MESSAGE SUR LA CONGESTION DU TRAFIC

Message informant des files d'attente à l'accès au port e long de la route SS125 côté sud, et conseil d'accéder au port par une autre route (par exemple, depuis la jonction nord de la SS125).

TYPE 2 - MESSAGE SUR LE RETARD D'UN NAVIRE

Message d'information sur les retards dans l'arrivée des navires au port, avec indication de la zone de stationnement temporaire à utiliser.

L'impact de ce message pourra être évalué une fois que les différentes zones de stationnement à utiliser auront été identifiées.

TYPE 3 - MESSAGE D'INACCESSIBILITÉ

Message d'information sur un accident de la circulation, indiquant un accès alternatif au port.

L'impact de ce message peut être évalué en définissant une stratégie de réorientation et d'intervention avec la police locale et la Police.

TYPE 4 - MESSAGE D'ENC ENC ENCOMBREMENT

Message d'information sur les files d'attente concernant les situations critiques générées par la congestion le long du réseau routier principal d'accès/sortie du port, comme par exemple via Principe Umberto ou le métro sur la SS 125 le long du front de mer du port de la ville d'Olbia, avec une indication du réseau routier alternatif.

L'impact de ce message peut être évalué en définissant une stratégie de réorientation et d'intervention avec la police locale et les forces de l'ordre.

3.3.3 DÉTECTEURS DE FLUX

La détection des flux de trafic est l'un des éléments fondamentaux du système d'information ITS : en effet, grâce à une surveillance continue, il sera possible, lorsque des conditions critiques seront détectées (flux de véhicules élevés et donc émissions sonores importantes), d'envoyer des messages avec les PMV qui avertissent les utilisateurs et réorientent leurs itinéraires. Pour être efficaces, les systèmes de surveillance du trafic ont été planifiés le long des artères les plus susceptibles d'être encombrées, à la fois par l'analyse de modélisation et les enquêtes de trafic réalisées et par une comparaison directe avec l'Autorité portuaire d'Olbia et d'autres acteurs locaux. En pratique, les localisations découlent de l'analyse des phénomènes de files d'attente les plus fréquents, souvent présents sur le système routier d'accès/sortie le plus immédiat au port (principalement sur le quai d'Isola Bianca), et de la nécessité complémentaire de connaître les flux plus généraux d'accès/sortie au port et les flux de transit sur le système routier du front de mer du port d'Olbia, constitué par la SS125. Les emplacements, avec leurs caractéristiques et leurs coordonnées, sont indiqués dans le tableau II.6 suivant, tandis que les figures suivantes montrent les emplacements des capteurs individuels.

ID	Rue	Position	Coordonnées
----	-----	----------	-------------

			N	E
SP n.1	Banchina Isola Bianca	En ligne avec le parking et sur la rampe de sortie	40,924755	9,509126
SP n.2	Isola Bianca	Près du parking d'Isola Bianca	40,924554	9,507624
SP n.3	S.P. 4M	Avant l'accès au métro, en direction du nord	40,921120	9,502346
SP n.4	S.P. 14M	Sortie Tempio	40,931265	9,508584

TABLE II.6 EMPLACEMENT DES DETECTEURS DE TRAFIC

La figure II.22 montre l'emplacement de toutes les infrastructures prévues pour le système d'info-mobilité basé sur le PMV.

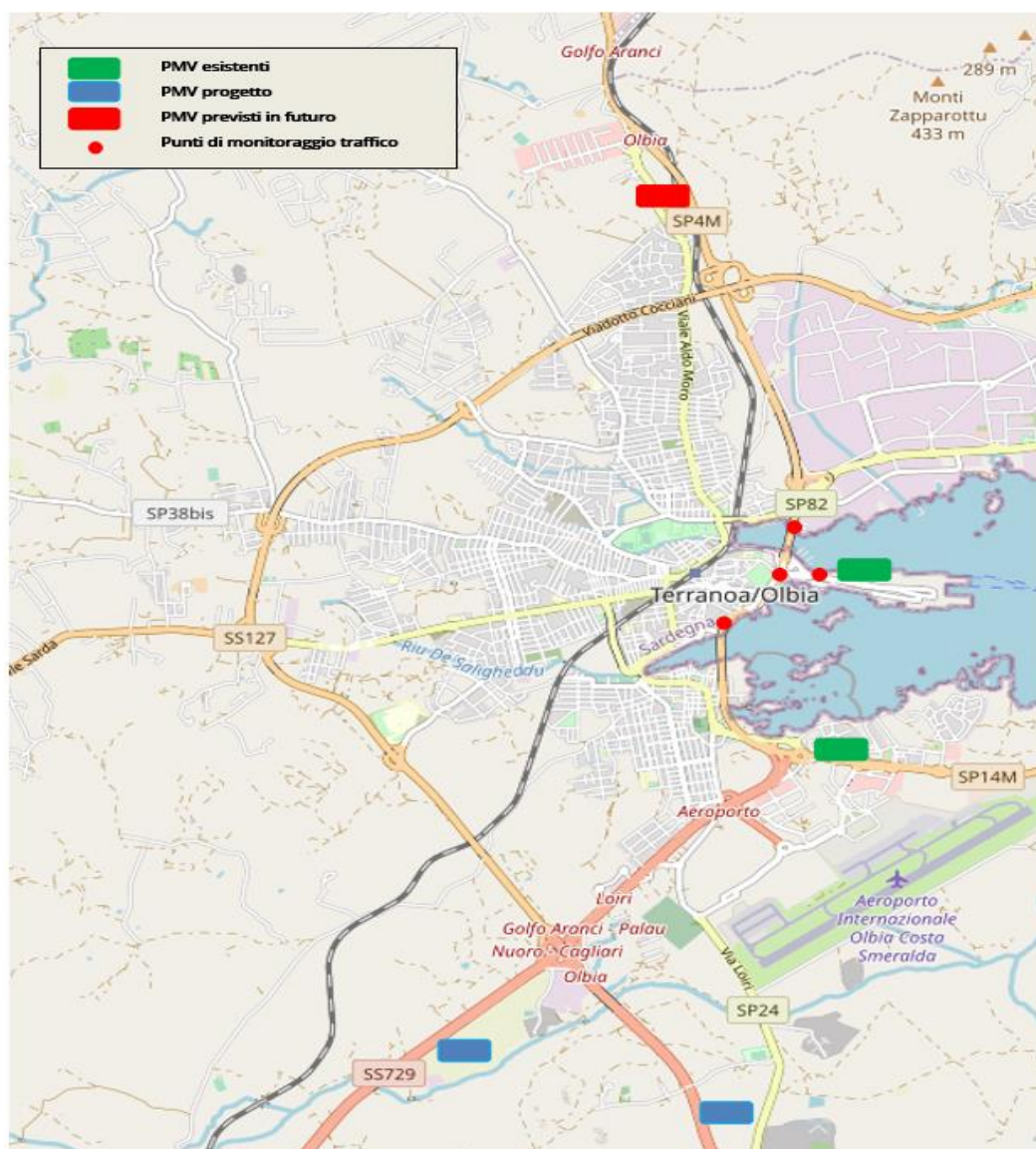


FIGURE II.22 - PLAN DE LOCALISATION DES INFRASTRUCTURES D'ARPENTAGE ET D'INFO-MOBILITE

3.4 L'APPLICATION DU MODÈLE PRÉDICTIF AVEC LES RÉSEAUX NEURONAUX AUX DONNÉES DE SIMULATION DE TRAFIC AVEC LE LOGICIEL SUMO

L'architecture de réseau neuronal adaptatif qui a été adoptée pour développer le modèle de prédiction s'est avérée adéquate pour reproduire de manière satisfaisante la dynamique de l'événement de bruit du trafic avec un raffinement temporel de 1 minute.

La présente étude illustre la capacité du modèle adaptatif à prédire dans quelle mesure des stratégies spécifiques de gestion et de redistribution du trafic automobile affectent la réduction du bruit urbain dans des zones spécifiques qui tombent sous l'influence des activités du port maritime de la ville d'Olbia. Les trois points de mesure qui ont été initialement sélectionnés pour le développement du modèle de prédiction sont dans cette phase reconsidérés pour analyser la réponse acoustique du modèle (en termes de pression acoustique équivalente $LeqA$, 1') lorsqu'il reçoit en entrée des scénarios de trafic sélectionnés de manière appropriée et générés numériquement.



FIGURE II.23: LOCALISATION DES SONOMETRES ET DES CAPTEURS DE TRAFIC DANS LA ZONE URBAINE DU FRONT DE MER DE LA VILLE PORTUAIRE D'OLBIA PENDANT LES CAMPAGNES EXPERIMENTALES DE 2019.

Le développement de cette étude est basé sur la capacité de généralisation du modèle afin de déterminer quelles valeurs de pression acoustique équivalente $LeqA$ seraient établies aux points de mesure phonométrique (FA, FB et FC sur la figure II.24) si un scénario de trafic donné se déroulait dans les 11 sections routières du front de mer du port d'Olbia. Les scénarios de trafic synthétiques appropriés dans les 11 sections de

route ont été générés à l'aide de l'outil de simulation numérique SUMO. Sur la base des performances démontrées par le modèle trafic-bruit dans les phases de généralisation de la période de pointe d'août et de la période douce de mars, on peut raisonnablement espérer que la réponse du modèle sera fiable même si la source des données d'entrée est le résultat de simulations numériques et non pas directement dérivée de mesures expérimentales. Il est à noter que la présente étude peut également être considérée comme un outil complémentaire pour une validation qualitative du modèle développé, en effet elle permet de vérifier la cohérence des réponses du modèle par rapport au phénomène physique de génération et de propagation du bruit acoustique..

3.4.1 MÉTHODOLOGIE

Pour obtenir des résultats comparables à ceux obtenus dans la phase de formation et de test du modèle neuronal, il est nécessaire que les données d'entrée synthétiques (générées numériquement) soient insérées correctement, c'est-à-dire qu'elles indiquent les valeurs des flux de véhicules se référant exactement aux mêmes positions dans lesquelles les valeurs expérimentales homologues ont été acquises et exprimées selon les mêmes unités de mesure.

De la même façon, les valeurs de sortie déterminées par le modèle ANN sont destinées à être référées aux mêmes points des valeurs expérimentales homologues (comme indiqué dans l'avant-propos).

Pour cette raison, nous indiquons en détail la méthode suivie pour l'élaboration.

3.4.1.1 Des données de trafic générées par le modèle SUMO à la composition par typologie

Comme les données fournies par l'outil de simulation SUMO sont exprimées en véhicules équivalents sur une base horaire pour chaque section de route considérée, alors que les données nécessaires à l'exploitation de l'ANNM sont exprimées en véhicules par minute, divisés en classes en fonction de leur longueur, plusieurs élaborations préliminaires ont été nécessaires pour harmoniser la nature des données. Tout d'abord, les données expérimentales sur la composition du trafic par classes et sens de circulation dans chaque section ont été prises en compte et la valeur normalisée (c'est-à-dire relative) pour chacune des valeurs des sections, des sens de circulation et des classes de véhicules a été dérivée.

Ensuite, les valeurs de débit générées par SUMO ont été distribuées selon la distribution normalisée pour l'heure de la journée considérée, en suivant les indications du HCM 1985 concernant les coefficients d'équivalence. Dans la section Error : reference source not found, un exemple d'un ensemble de données numériques sur le trafic est donné, qui a été utilisé comme entrée pour le modèle afin de déterminer les valeurs de niveau de pression acoustique équivalent.

Section	Direction	Total des véhicules équivalents	Absolu de la simulation SUMO					
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Tot
1A		931.85	208.8629	498.0578	185.911	18.36158	12.91048	924.1037
1B		796.65	25.5512	635.1299	119.5431	9.12543	4.562715	793.9124
1C		780.6	42.38106	664.2985	61.10758	5.913636	4.312027	778.0128
1D USCITA DAL PORTO	dir 1	1227	17.69712	147.476	740.3293	224.1635	60.83383	1190.5
1D DIREZ. PORTO	dir2	703	49.35674	158.7419	273.463	136.0645	53.35863	670.9848
1E			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
2A DIREZ. NORD	dir 1	664.7	64.78558	211.201	325.2236	34.98421	17.81603	654.0104
2A DIREZ. SUD	dir2	502.05	16.3712	158.2549	233.2895	66.84905	17.05333	491.818
3A (SOLO DIR. SUD)		405.45	23.85	220.6125	146.0813	1.490625	8.384766	400.4191
3B DIR. NORD	dir 1	1056.6	56.8676	890.5466	85.3014	15.92293	4.975915	1053.614
3B DIR. SUD	dir2	960.75	30.90132	769.7237	141.3969	11.23684	4.682018	957.9408
3C DIR. SUD	dir 1	796.65	25.66881	635.3032	119.1766	9.167434	4.583717	793.8998
3C DIR. NORD	dir2	780.6	42.43464	665.1383	60.19798	5.921113	4.317478	778.0095

TABLE II.7 COMPOSITION HORAIRE DU TRAFIC DE VEHICULES DE 11H A 12H DONNEES RECAPITULATIVES AVEC UNE DISTRIBUTION EQUIVALENTE A CELLE EXPERIMENTALE MESUREE DE 11H A 12H LE 26 AOUT 2019..

3.4.1.2 Construction de l'ensemble de données synthétiques

Pour chacun des scénarios de trafic envisagés, un ensemble de données synthétiques a été créé selon la méthodologie exposée. Toutefois, les simples valeurs instantanées générées par SUMO pour les différents scénarios analysés ne sont pas complètes pour garantir le fonctionnement correct du modèle, qui prévoit la possibilité de prédire la sortie également en fonction d'un certain nombre de régresseurs du trafic et du bruit (c'est-à-dire un certain nombre de valeurs de trafic et de bruit précédant l'instant actuel). Pour cette raison, il a été nécessaire de fournir à l'ensemble de données un nombre suffisant de données historiques (c'est-à-dire des données dynamiques, variant dans le temps) qui ont été préalablement insérées (selon la série chronologique de référence) et interpolées à ces dernières. Enfin, les valeurs du point synthétique ont été considérées comme stationnaires pour un intervalle de temps ultérieur afin de permettre la stabilisation de la réponse de sortie du réseau neuronal et l'amortissement d'éventuelles composantes de haute fréquence sur le signal de sortie (en termes de LeqA).

Un exemple d'un ensemble complet de données sur les termes dynamiques, transitoires et stationnaires est présenté à la figure II .25. Chaque couleur représente une classe de véhicules et un sens de circulation. Notez à gauche, indiquée par la flèche verte, la composante dynamique (historique), à droite la composante stationnaire (flèche bleue) et au milieu la phase transitoire en pointillés..

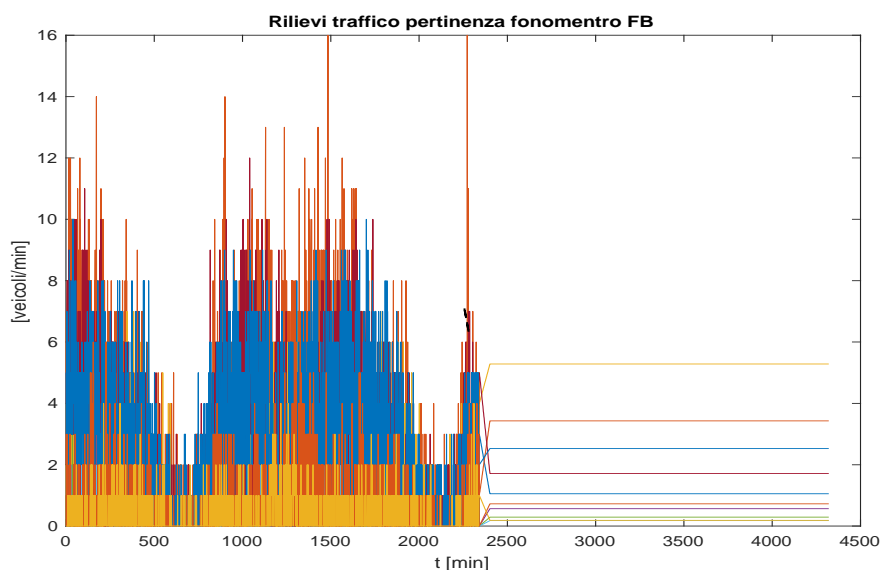


FIGURE II.24 EXEMPLE D'UN ENSEMBLE DE DONNEES SYNTHETIQUES, AVEC DES TERMES DYNAMIQUES, TRANSITOIRES ET STATIONNAIRES. CHAQUE COULEUR REPRESENTA UNE CLASSE DE VEHICULE ET UNE DIRECTION DE DEPLACEMENT.

Il faut noter que les données historiques atteignent l'heure de la journée à laquelle se réfèrent les scénarios de trafic simulés dans le modèle de transport SUMO, c'est-à-dire que ces données ponctuelles sont insérées dans la série temporelle expérimentale à l'heure à laquelle elles se réfèrent, afin de rendre l'estimation et le fonctionnement du réseau neuronal plus fiables et robustes.

Pour chaque station phonométrique, on a construit un ensemble de données analogues avec les sections de route concernées.

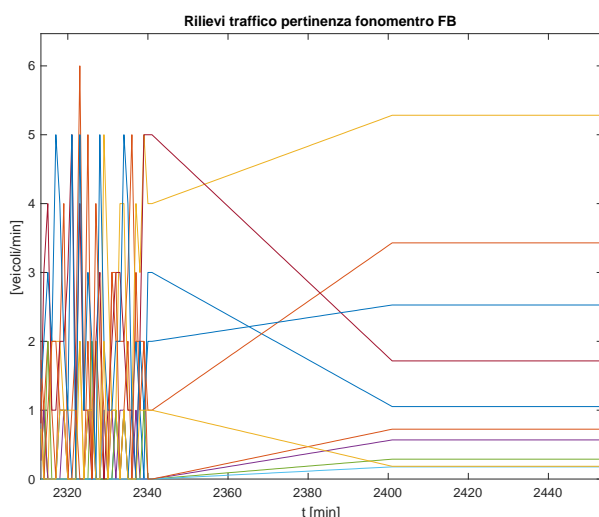


FIGURE II.25 DETAIL SUR LE TRANSITEUR DE LA FIGURE II.25. CHAQUE COULEUR REPRESENTA UNE CLASSE DE VEHICULE ET UNE DIRECTION DE DEPLACEMENT.

3.4.2 RÉSULTATS

Les scénarios examinés pour les simulations sont décrits ci-dessous. A la fin du paragraphe, un résumé des estimations obtenues pour chaque station phonométrique et chaque scénario est également rapporté. Pour les données relatives aux estimations du trafic de véhicules renvoyées par le logiciel SUMO et les ensembles de données synthétiques, avec les termes dynamiques, transitoires et stationnaires, veuillez vous référer à l'élaboration étendue jointe au projet Report.

Scénario 1

Ce scénario se rapporte à la situation actuelle de la période de pointe de 11h à 12h et vise à vérifier la correspondance des simulations, sans stratégies de redirection, avec les données expérimentales, par le biais d'une calibration du modèle SUMO, utilisé comme générateur de données de trafic à fournir en entrée du modèle neuronal.

Le scénario représente la modélisation numérique d'une configuration globale très similaire à celle observée dans la période de pointe de 11 heures à 12 heures pendant la campagne expérimentale, à la même heure et avec des conditions aux limites similaires. Les valeurs du flux de véhicules et du bruit sont proches et cohérentes avec celles acquises expérimentalement.

Scénario 2

Ce scénario se réfère à la période de pointe de 11 heures à 12 heures et prend en compte les PMV actifs, aussi bien les deux en direction du port que celui qui quitte le port sur le quai d'Isola Bianca.

Il simule la situation que l'on pourrait enregistrer si les flux de trafic étaient déviés de manière appropriée par l'utilisation de panneaux à messages variables et d'Apps. Les valeurs des flux de trafic et du bruit sont différentes de celles du scénario 1. On constate que les valeurs LeqA sont généralement plus faibles que dans le scénario 1, ce qui indique qu'une telle intervention produira sans aucun doute des avantages en termes d'atténuation du bruit du trafic..

Scénario 3

Ce scénario, comme le scénario 1, est lié à la situation actuelle mais se réfère à la tranche horaire de 08 à 09 avec l'état actuel des flux résultant du modèle de trafic calibré avec les données de trafic en période de pointe estivale.

Ce scénario représente la modélisation numérique d'une configuration globale très similaire à celle observée dans la tranche horaire 8h-9h de la période de pointe lors de la campagne expérimentale à la même heure et avec des conditions aux limites similaires. Les valeurs du flux de véhicules et du bruit sont proches et cohérentes avec celles acquises expérimentalement.

Scénario 4

Il s'agit du scénario de conception, dans la tranche horaire 8h00-9h00, lorsqu'un grand navire est censé partir et arriver pendant l'heure de pointe. Cela génère un flux de 530 véhicules/h en direction du port et de 900 véhicules/h en provenance du port, sans réacheminement dû à l'effet des PMV et des APP.

Contrairement au scénario 5, nous simulons ici la situation qui pourrait se produire si les flux de trafic n'étaient pas déviés de manière appropriée par l'utilisation de panneaux à messages variables et d'Apps afin d'atténuer le bruit sur le front du port lorsqu'un grand navire est attendu au départ et à l'arrivée. Les valeurs de débit de véhicules et de bruit sont sensiblement plus élevées que dans le scénario 3. On constate que les valeurs LeqA sont en général plus élevées que dans le scénario 5, ce qui indique que, sans atténuation du bruit de la circulation, les valeurs de niveau sonore équivalent aux points d'observation seraient nettement plus élevées..

Scénario 5

Il s'agit du scénario de conception, dans la tranche horaire 8h00-9h00, lorsqu'un grand navire est censé partir et arriver pendant l'heure de pointe. Cela génère un flux de 530 véhicules/h en direction du port et de 900 véhicules/h en provenance du port, avec une réorientation due à l'effet des PMV et des APP.

Ce scénario simule la situation qui pourrait être enregistrée si les flux de trafic étaient convenablement redirigés grâce à l'utilisation de panneaux à messages variables et d'Apps afin d'atténuer le bruit sur le front du port entre 8 et 9 heures du matin en période de pointe. Les valeurs relatives au flux de véhicules et au bruit sont sensiblement différentes de celles du scénario 4. On constate que les valeurs LeqA sont généralement plus faibles que dans le scénario 4, ce qui indique qu'une telle intervention produit sans aucun doute des avantages substantiels en termes d'atténuation du bruit du trafic.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
FA	66.40 dB	66.23 dB	70.93 dB	68.30 dB	67.91 dB
FB	68.11 dB	67.56 dB	67.96 dB	68.36 dB	67.93 dB
FD	72.67 dB	64.57 dB	73.57 dB	74.11 dB	73.55 dB

TABLE II.8 APERÇU DES VALEURS PREDITES PAR LE MODELE ANN POUR CHAQUE SCENARIO.

3.4.2.1 Considérations et comparaisons sur les valeurs estimées par le modèle de réseau neuronal en fonction des scénarios générés par sumo

L'utilisation du modèle ANNM pour prédire quelles valeurs de LeqA seraient établies dans les points d'observation FA, FB et FD, en réponse aux valeurs des flux de trafic des scénarios qui ont été élaborés par le modélisateur de transport SUMO, permet d'avoir une estimation supplémentaire par rapport à celle fournie par les modèles acoustiques physiques. En effet, par rapport à ce dernier, le résultat élaboré au moyen d'un modèle

heuristique basé sur des réseaux neuronaux offre l'avantage de pouvoir apprécier de manière dynamique et plus granulaire la tendance temporelle du phénomène physique et la corrélation entre la cause (le flux de véhicules), les conditions limites (à considérer comme concause en termes de sources de bruit de fond) et l'effet considéré comme le bruit total mesurable aux points d'observation.

Comme on peut le voir dans le Table II.8, on peut apprécier un effet significatif du détournement du trafic automobile sur le bruit estimé.

Afin de faciliter la lecture et la comparaison des données résumées dans le tableau, la même couleur a été utilisée pour les cellules relatives aux scénarios de trafic ayant les mêmes conditions limites et qui sont comparables. En considérant la tranche horaire de 11h à 12h (période de pointe), on peut noter que les valeurs estimées par le modèle ANNM pour le scénario 2 indiquent une atténuation du bruit dans chaque point d'observation (par rapport au scénario 1) avec une réduction sensible dans le point d'observation FD en raison de l'effet plus important sur les flux de véhicules générés par le détournement dans les routes proches de ce point de mesure acoustique.

De même, pour la période de pointe de 8h00 à 9h00, on peut observer que, en comparant les valeurs de bruit estimées pour le scénario 5 avec celles des scénarios 4 et 3, une réduction significative du bruit est estimée en supposant un réacheminement important du trafic au moyen de PMV et d'APP. Cette estimation indique un avantage qui pourrait être produit par des réorganisations appropriées du trafic visant à atténuer le bruit, qui n'affectent toutefois pas les activités portuaires normales.

4. RÉSUMÉ DE LA VALIDATION DU MODÈLE

Ce paragraphe présente les résultats obtenus lors du processus de validation du modèle de simulation dynamique trafic-bruit basé sur un algorithme de machine learning qui a été développé dans le cadre des activités de recherche envisagées par le groupe de projets Interreg (bruit et ports) appelé Report et List Port pour la prédiction du bruit du trafic de véhicules sur les waterfront des villes portuaires.

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, le modèle a été appliqué et testé avec succès dans une ville portuaire méditerranéenne (Olbia) sur trois sites représentatifs du front de mer. En particulier, une intersection avec des feux de circulation, un rond-point et une grande entrée de métro ont été prédits pendant deux périodes caractéristiques, au cours desquelles l'intensité du trafic varie fortement entre les conditions de circulation en période douce et en période de pointe. Cette première étude exploratoire a révélé une bonne performance prédictive du modèle, car l'erreur de prédiction de $L_{eq,1'}$ est restée principalement confinée dans la plage de ± 1 dB et l'évolution temporelle du profil simulé de $L_{eq,1'}$ reflète la séquence expérimentale correspondante pendant tout l'intervalle de mesure. En outre, l'adéquation du processus d'identification a été confirmée par les fonctions d'autocorrélation et d'intercorrélation entre l'erreur de prédiction et les séquences de données sur le trafic, qui confirment la capacité du

modèle neuronal identifié à expliquer la dépendance fonctionnelle sous-jacente aux observations expérimentales.

Afin de compléter la procédure de validation de la méthodologie adoptée pour développer le modèle de prédiction du trafic- bruit, un contexte de waterfront d'une autre ville maritime (Cagliari) a été considéré, qui présente une disposition du réseau routier en front de mer différente de celle de la première étude de cas (Olbia).

Le contexte acoustique de référence est donc fortement influencé par les flux de trafic touristique et les activités portuaires dont la grande variabilité ne peut être facilement délimitée par une caractérisation a priori. Il convient de noter que les modèles statiques de prévision du bruit de la circulation, fondés sur des hypothèses purement statistiques, ne sont pas entièrement satisfaisants pour extraire des informations ou pour appuyer les décisions relatives à la gestion dynamique de la circulation dans de tels contextes acoustiques, où les niveaux de bruit peuvent subir des fluctuations importantes sur des échelles de temps variables et imprévisibles. Un modèle de simulation dynamique fiable offre la possibilité de soutenir la prise de décision dans la gestion du trafic avec un raffinement temporel adéquat où la capacité de

un modèle de simulation dynamique fiable offre la possibilité de soutenir les processus de prise de décision dans la gestion du trafic avec un raffinement temporel adéquat, où la capacité de prévoir les effets de différentes stratégies de trafic peut être très utile et décisive.

Le modèle qui a été développé au cours des activités du projet Report consiste en un système d'identification dynamique non linéaire, basé sur un réseau neuronal artificiel adaptatif qui identifie dynamiquement le phénomène du bruit de la circulation au fil du temps et est capable de fournir une prédiction du niveau de pression acoustique $L_{eq,1'}$ avec un raffinement temporel de 1 minute. L'architecture adoptée pour le développement du modèle est non linéaire, autorégressive et accepte des entrées exogènes et des régresseurs de rétroaction comme source des données d'entrée.

L'architecture de réseau neuronal qui a été développée offre des avantages significatifs en termes d'efficacité de calcul et peut être utilisée efficacement dans des problèmes inverses pour l'identification des stratégies de gestion du trafic qui pourraient être mises en œuvre pour atténuer les zones spécifiques particulièrement exposées aux fluctuations du bruit acoustique dans les villes portuaires.

Afin de procéder à la validation du modèle de bruit du trafic basé sur l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage automatique, une comparaison a été faite entre les séquences de données expérimentales, acquises sur le terrain, et les séquences générées par le modèle de simulation. Il ne faut pas oublier que le modèle a clairement été entraîné avec une partie seulement de la séquence expérimentale.

Le partenaire ARPAT a été chargé de l'acquisition de données acoustiques et de trafic en divers points du réseau routier urbain de Cagliari et dans la zone portuaire de Via Roma. Les données sur le trafic et le bruit ont été acquises, avec une période

d'échantillonnage de 100 ms, la classification des véhicules qui passent et leur vitesse de transit respective, pendant deux sessions de surveillance consécutives d'environ 50 heures chacune.

Le premier contrôle effectué porte sur les points Pa1, Pa2 et Pa3, indiqués par des symboles verts. Des données sur le niveau et le trafic sont disponibles pour chaque point. La durée utile totale de la surveillance est de 52 heures, commençant à 02h00 le 13 juillet 2020 et se terminant à 06h00 le 13 juillet 2020..

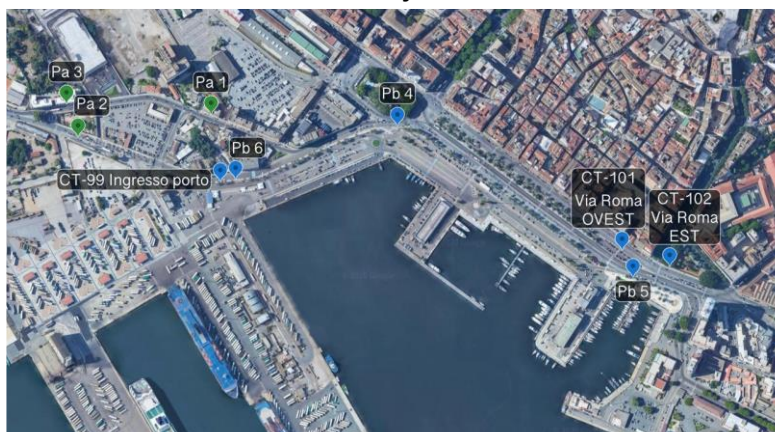


FIGURE II.26 CARTE DES LIEUX DE MESURE. EN VERT LES POINTS DE LA PREMIERE SERIE, EN BLEU LES POINTS DE LA DEUXIEME SERIE DE SURVEILLANCE

La deuxième période de surveillance couvre les points Pb4, Pb5 et Pb6, indiqués par des symboles bleus. En raison de la complexité du réseau routier, des mesures de trafic plus complexes ont été effectuées, ce qui a nécessité l'utilisation de différents compteurs de trafic pour deux des trois points (Pb5 et Pb6).

Au point Pb5 (), trois compteurs de trafic ont été utilisés, un pour chaque direction sur la Via Roma (CT-101 et CT-102) et un sur la promenade du 11 septembre à New York.

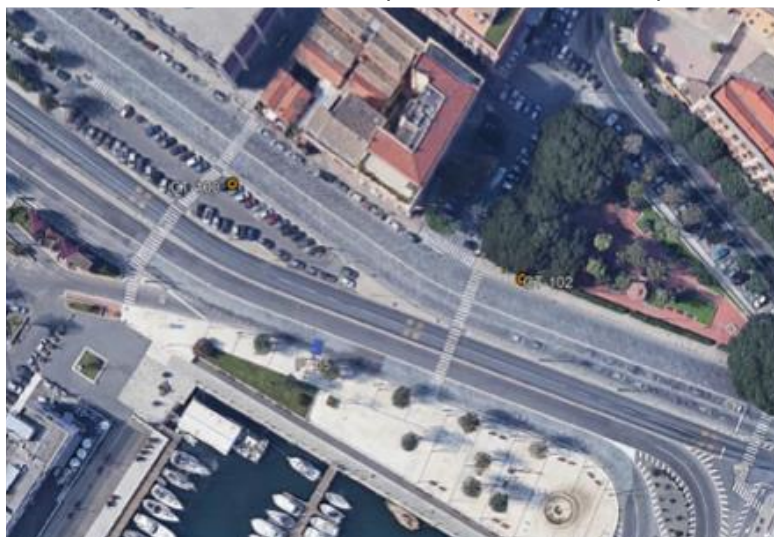


FIGURE II.27 DETAIL DU POINT PB5 EXTRAIT DU RAPPORT FOURNI PAR LE CONTRACTANT

Au point Pb6 (), en plus du compteur de trafic visant la Via Ripa di Ponente, un autre compteur de trafic a été utilisé pour surveiller le trafic entrant dans le port (CT-99).



FIGURE II.28 DETAIL DU POINT CT-99 EXTRAIT DU RAPPORT FOURNI PAR LE CONTRACTANT

La durée utile totale de la surveillance est de 53 heures à partir de 10 heures le 15 juillet 2020 jusqu'à 15 heures le 17 juillet 2020.

Afin de déterminer les matrices de séquence d'entrée et de sortie utiles pour effectuer l'entraînement du modèle neuronal, le partenaire UniCA a appliqué une étape de pre-filtering aux données expérimentales d'entrée du trafic et de sortie du niveau de pression acoustique afin de rendre la phase d'entraînement plus efficace. En fait, l'élimination du contenu informatif inutile ou redondant des matrices d'apprentissage est souvent nécessaire pour éviter une taille élevée de la matrice et, en même temps, la normalisation de l'échelle des données d'entrée évite que la fonction de transfert du modèle neuronal ne soit soumise à une saturation des valeurs de sortie.

Le modèle est caractérisé par une architecture qui a deux entrées. Plus précisément, l'entrée de données exogènes est alimentée par la séquence de données de trafic et l'entrée de rétroaction accepte les régresseurs des données acoustiques de sortie. Cette stratégie permet de considérer les données passées pour collaborer avec l'entrée exogène afin de prédire les données acoustiques futures.

Une partie des données d'entrée (trafic) et de sortie (bruit) a été utilisée pour la formation, c'est-à-dire pour construire les nœuds et les poids de liaison du réseau neuronal, une partie a été réservée à la validation, c'est-à-dire à la vérification pendant la formation et enfin, une autre partie des données a été affectée à la phase de test. Il est clair que les records de la séquence de l'ensemble de test n'ont pas été inclus dans le processus d'apprentissage mais ont été pris en compte uniquement pour vérifier le pouvoir de prédiction du modèle, en généralisant ce qui a été appris à partir du sous-ensemble d'apprentissage.

Un ensemble d'apprentissage de 50% des données expérimentales de la campagne d'acquisition a été considéré et les 50% restants ont ensuite été utilisés pour la phase de test. Il est utile de souligner que, de toute évidence, UniCa ne dispose pas de l'ensemble complet de données de test, car il est nécessaire de réaliser les conditions

pour effectuer une “blind validation” du modèle de prédiction.

Les figures 4, 5 et 6 montrent le traitement effectué par le modèle. Les panneaux supérieurs (4A, 5A et 6A) montrent les comparaisons entre le niveau de pression acoustique $L_{eq,1h}(\tau)$ du bruit mesuré expérimentalement et la tendance simulée prévue par le modèle. Les panneaux du bas (4B, 5B et 6B) montrent les tendances des erreurs de prédiction relatives entre les deux séquences.

On peut observer que les valeurs, tant simulées qu'expérimentales, des niveaux de pression acoustique sont rapportées sur une base temporelle d'une heure, bien que le modèle soit encore capable de générer des prédictions avec un raffinement temporel d'une minute. Ce choix est dû au fait que pour effectuer une validation du modèle qui se référerait à la performance des modèles commerciaux et certifiés existants sur le trafic-bruit, il était nécessaire de conformer le fonctionnement du modèle d'apprentissage à la génération de données sur une base horaire.

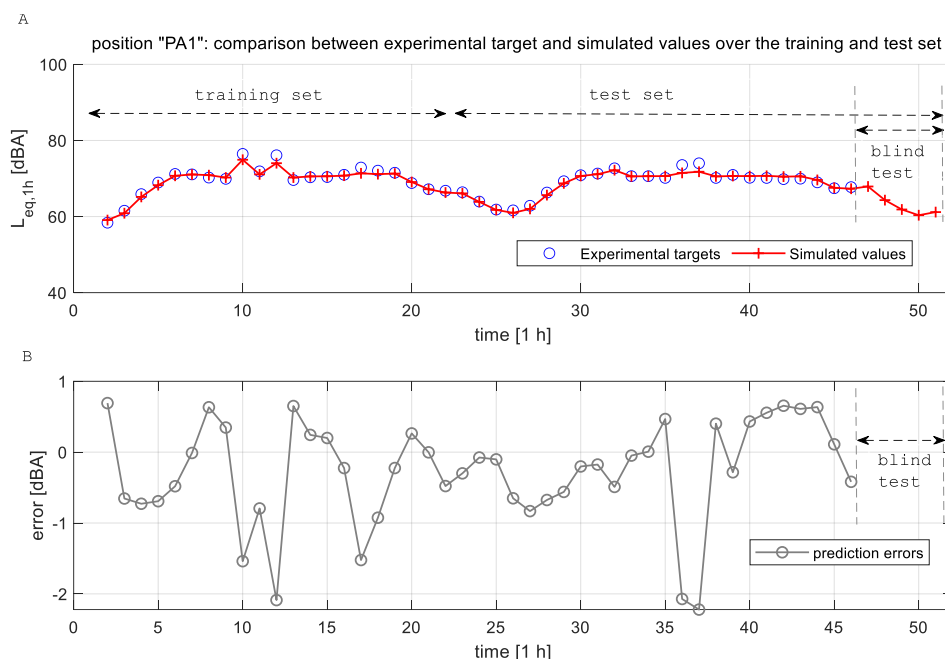


FIGURE II.29 COMPARAISON DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{eq,1h}(t)$ AU POINT DE MESURE PA1.

FIGURE 4B TENDANCE DE L'ERREUR DE PREDICTION A PA1

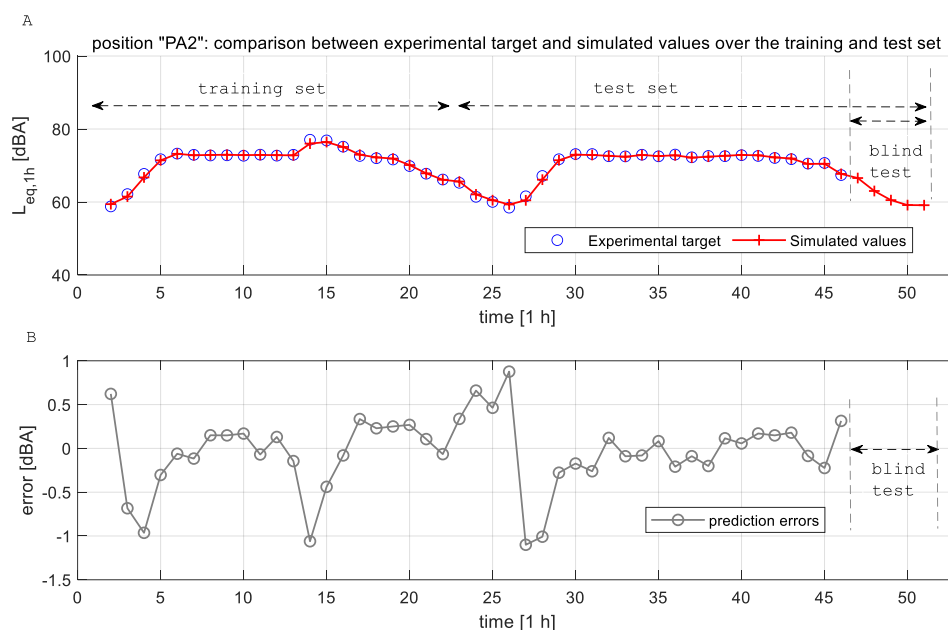


FIGURE II.30 COMPARAISON DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{(EQ,1H)}(T)$ AU POINT DE MESURE PA2.
FIGURE 5B TENDANCE DE L'ERREUR DE PREDICTION A PA2

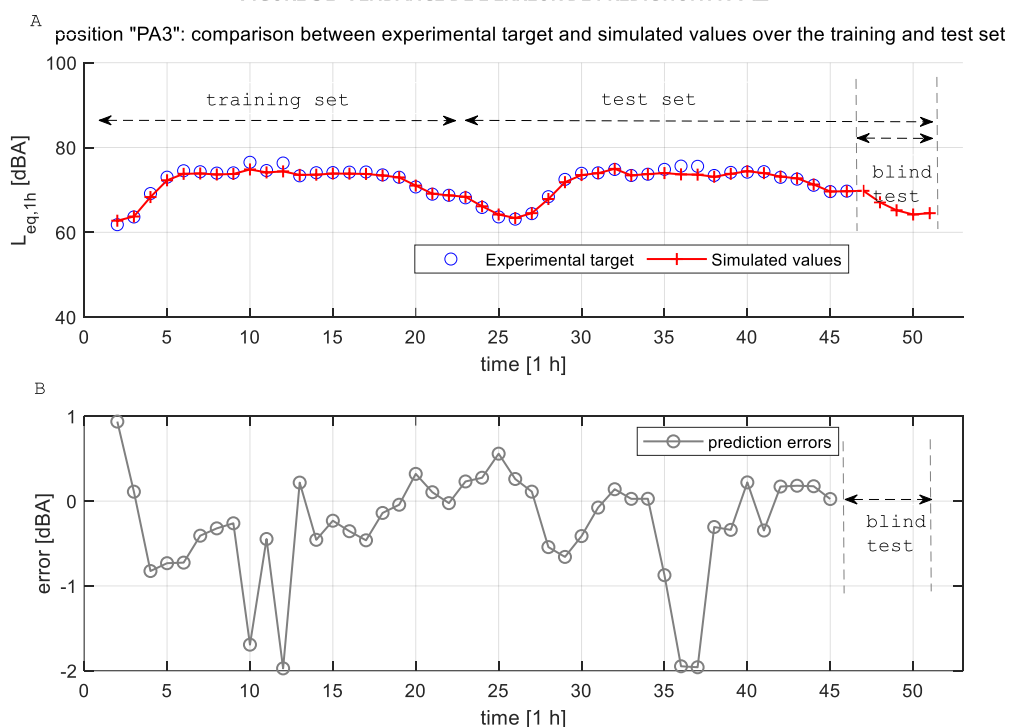


FIGURE II.31 COMPARAISON DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{(EQ,1H)}(T)$ AU POINT DE MESURE PA3.
FIGURE 6B TENDANCE DE L'ERREUR DE PREDICTION

5. L'IDENTIFICATION DE L'IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

A partir de ce qui a été développé dans les produits T2.2.1 et T2.2.2, il est possible de

faire le bilan des activités réalisées et de tirer des indications méthodologiques utiles pour aborder le problème du bruit à proximité des zones portuaires dans les villes côtières, considérant que des procédures standardisées n'ont pas encore été définies. L'hypothèse étudiée est un système de gestion et de régulation des flux de véhicules adapté à la spécificité du trafic portuaire, caractérisé par des fluctuations considérables de composition et d'intensité dans des intervalles de temps très courts. L'objectif est d'intégrer dans un seul système ITS des procédures agiles de soutien et de vérification des actions prises dans le domaine des transports pour diriger et canaliser le trafic sur la base d'une analyse des données quasiment en "temps réel". Ces procédures de soutien font appel à l'application de :

- **un modèle prédictif (dynamique)**, capable de donner la valeur correcte du niveau de pression acoustique qui serait généré en un point donné en correspondance avec un scénario assigné de composition et de disposition du trafic sur les sections de route qui ont fait l'objet d'une étude expérimentale.
- **une reconstruction spatiale du climat acoustique basée** sur un modèle de propagation physique (statique).
- **un modèle pour l'analyse et la prédiction des flux de véhicules.**

L'élaboration de ces modèles fait partie intégrante de la recherche et la possibilité de leur application, en particulier du modèle prédictif dynamique, a orienté et qualifié le développement de l'hypothèse de travail, notamment en ce qui concerne la ville d'Olbia. Afin de définir un profil méthodologique unitaire centré sur l'application de ces modèles de prévision, nous soulignons ci-dessous un certain nombre d'aspects considérés comme essentiels, en retraçant les phases fondamentales des activités décrites dans cette section II.

La première étape, qui ne peut être ignorée, est l'investigation cognitive de la réalité urbaine et de son sous-système portuaire dans lequel les actions d'atténuation du bruit doivent être entreprises. Chaque ville côtière caractérisée par la présence d'un port d'escale a ses propres spécificités qui doivent être identifiées et soigneusement évaluées. Par conséquent, la dynamique intrinsèque du système de transport doit être étudiée et des campagnes ciblées de mesure des flux de trafic doivent être menées en étroite coordination avec la surveillance du bruit environnemental sur un ensemble suffisamment large d'intervalles de temps. Cette phase du projet a permis d'acquérir un important corpus de données représentatif de l'environnement étudié, qui met clairement en évidence la corrélation trafic-bruit, la contribution prédominante du trafic automobile au bruit environnemental et la variabilité saisonnière du phénomène. D'une manière générale, il est nécessaire d'optimiser les ressources instrumentales pour la surveillance afin de créer un ensemble de données expérimentales qui expriment une variabilité et une dynamique suffisamment larges.

Les données acquises ont été contrôlées quant à leur cohérence et leur fiabilité et

analysées pour extrapoler les tendances et les plages de variabilité des quantités examinées. Après une phase initiale d'homogénéisation, les mêmes données ont été utilisées comme données d'entrée pour le développement du modèle prédictif du trafic-bruit pour lequel des algorithmes de réseaux neuronaux ont été utilisés. L'algorithme vise à capturer et à reproduire la corrélation intrinsèque entre le trafic et le bruit qui existe au niveau physique dans le contexte spécifique. La vérification des données est donc d'une importance fondamentale afin d'identifier, en dehors de l'incertitude intrinsèque des systèmes de mesure, les incohérences et les erreurs qui peuvent conduire à des résultats contradictoires et trompeurs.

Les tests de calcul et de calibrage du modèle ont également montré qu'il est nécessaire de garantir, lors de la surveillance préliminaire, la contiguïté spatiale entre les sections d'étude du flux de trafic et les stations d'étude du bruit phonométrique, et de réorganiser les données d'entrée ainsi acquises selon un raffinement temporel congru. Afin d'obtenir des performances satisfaisantes de l'algorithme, il est nécessaire d'opérer sur des balayages temporels restreints (par exemple 1 minute) et de circonscrire localement la zone d'étude. Même si le modèle est "robuste", ses performances et, par conséquent, son applicabilité diminuent considérablement lorsque les données d'entrée sont dispersées et faiblement corrélées.

Il convient de noter que cette indication de méthode, valable dans la perspective de l'élaboration d'un modèle heuristique, s'écarte d'une approche plus conventionnelle, visant généralement à caractériser les arcs routiers avec des valeurs de paramètres de référence moyennées sur des intervalles et des périodes de durée variable, donc soutenues par une large base statistique.

Outre cette première phase de modélisation, les données acquises sur le bruit et le trafic ont ensuite été utilisées pour calibrer un modèle de propagation physique qui a rendu la cartographie acoustique du waterfront du port au moyen de courbes de niveau d'isolation acoustique. Ces représentations ont été construites sur une plateforme logicielle commerciale, en attribuant aux sources routières les valeurs des flux de trafic détectés, conformément à la norme européenne CNOSSOS-EU. La bonne superposition des valeurs simulées dans les points de contrôle coïncidant avec les stations de relevés phonométriques a permis un retour positif sur l'application correcte du modèle de propagation physique.

Dans une procédure standardisée, les cartes acoustiques pourraient avoir pour fonction de représenter la distribution spatiale des niveaux de pression acoustique correspondant à un scénario de trafic donné et d'estimer/évaluer de cette manière la valeur des indicateurs acoustiques en des points qui ne sont pas directement surveillés et pas directement prévus dans le modèle dynamique. Les cartes de bruit, validées par des mesures expérimentales aux points de contrôle, peuvent également représenter l'évolution du bruit dans l'espace physique pour chaque scénario de réorganisation du trafic retenu dans les stratégies de régulation.

Afin de construire le modèle de trafic, d'autres mesures des flux de véhicules ont ensuite été effectuées pour évaluer les niveaux de congestion des principales routes connectées au système routier du port ainsi que la distribution horaire et le trafic quotidien moyen. La construction du modèle de simulation du trafic a été réalisée à l'aide du logiciel SUMO, qui a également été utilisé pour préfigurer certains scénarios de réorganisation du trafic à la suite d'un réacheminement avec des systèmes d'info-mobilité. Dans le modèle de réseau neuronal, les données de simulation du trafic renvoyées par le logiciel SUMO ont servi d'entrée pour certaines hypothèses de régulation du flux avec l'envoi de messages spécifiques sur les PMV. Les améliorations possibles en termes de réduction des niveaux de pression acoustique aux points de contrôle ont ensuite été quantifiées de manière analytique.

Afin de tester le modèle neuronal sur un scénario différent, dans une deuxième phase l'algorithme a été appliqué au cas de la zone portuaire de Cagliari, en obtenant des indications supplémentaires sur les potentialités, les limites du modèle et les méthodologies nécessaires pour sa mise en œuvre.

La série d'actions mises en œuvre pour s'attaquer au problème du bruit du trafic portuaire a jusqu'à présent donné des résultats positifs. Les étapes décrites ci-dessus, même avec les apports de contextes et de modes opératoires différents, peuvent constituer l'ébauche d'une procédure commune, exportable également vers d'autres réalités, dans laquelle les diverses contributions dans le domaine de la modélisation et de la planification des transports peuvent converger. D'autres indications viendront de la mise en œuvre du système de gestion et de régulation, qui permettra également de vérifier l'efficacité des actions d'atténuation entreprises.

5.1 Vade-mecum de la méthodologie de surveillance

Vous trouverez ci-dessous quelques notes utiles pour la planification et la réalisation de la surveillance du climat sonore et des flux de trafic..

5.1.1 Définition de la zone d'étude.

La planification des activités de surveillance doit inclure une définition précise de la zone d'étude dans laquelle la gestion et la régulation des débits doivent être entreprises. En ce sens, il convient tout d'abord d'identifier les quais d'accostage des navires de passagers et de marchandises ainsi que les voies d'accès/de sortie routières possibles depuis la zone portuaire. Par analogie thermodynamique, les zones portuaires peuvent être définies comme des "systèmes ouverts" en échange continu avec les zones adjacentes. L'objectif est de soutenir les processus décisionnels à l'aide d'un modèle capable de saisir la dynamique réelle des flux de trafic, notamment ceux induits par les activités portuaires. Il est donc nécessaire de définir une "zone de contrôle", de surveiller les flux entrants et sortants pendant un certain intervalle de temps, d'identifier les éventuelles sources de bruit internes et externes et de signaler la présence d'éventuels

récepteurs sensibles.

La zone de contrôle doit être un sous-ensemble du système urbain qui peut être facilement cadré en termes d'équilibre des flux entrants/sortants, sachant qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une analyse statistique pour la caractérisation des axes routiers, utile pour la planification de la mobilité et des infrastructures, mais plutôt de saisir quelques instantanés des configurations de trafic et du climat acoustique correspondant qui expriment une dynamique suffisamment variée.

5.1.2 Définition des périodes de suivi.

La spécificité du trafic induit par la présence du port consiste en une extemporanéité et une variabilité marquées au sein de l'année solaire, de la saison et même du jour unique. Les actions du projet visent précisément à corriger les effets de cette variabilité afin de minimiser ses répercussions négatives sur le climat acoustique. Afin de saisir la dynamique du waterfront, il est donc nécessaire de planifier la surveillance en tenant compte de la périodisation suivante :

- **période douce** - période de pointe. Les périodes de l'année à caractériser doivent être soigneusement évaluées avec les autorités de gestion portuaire en acquérant à l'avance des données sur le trafic maritime sur une base annuelle. Outre les départs de navires et les postes d'amarrage, il faut tenir compte d'autres facteurs qui peuvent entraîner des augmentations ou des diminutions du trafic journalier moyen en fonction également de la vocation de l'escale et de la ville portuaire selon qu'elle se caractérise comme un port d'escale de passagers ou de commerce, un centre industriel ou une ville touristique.
- **jour - soir - matin.** La tendance des paramètres surveillés doit couvrir l'ensemble de la période de 24 heures pendant plusieurs jours afin de saisir les variations horaires typiques tant en période douce qu'en période de pointe.
- **jours fériés - jours de la semaine.** Pour chaque ville étudiée, il est utile de saisir les variations globales et les variations pour les tranches horaires liées aux déplacements pour le travail, les écoles etc....

5.1.3 Identification des sections routières participant au suivi

Idéalement, les sections de suivi devraient restituer toutes les valeurs des passages de véhicules qui contribuent à la définition du climat acoustique du port et des zones péri-portuaires, déduction faite du bruit de fond environnemental ou du bruit provenant d'autres sources. En pratique, cela peut s'avérer difficile à réaliser pour de nombreuses raisons, en premier lieu à cause de la conformation et/ou de l'extension excessive de la zone d'étude, mais aussi à cause de l'insuffisance des ressources instrumentales pour

effectuer les mesures.

Il est certain que pour optimiser le choix des tronçons routiers, une évaluation préalable minutieuse du réseau routier et des flux est nécessaire et, si besoin est, une redéfinition de la zone de contrôle.

En général, le positionnement doit être orienté vers

- définir globalement tous les flux de trafic dans la zone d'étude
- définir globalement les flux de véhicules qui peuvent potentiellement contribuer au niveau sonore d'une station phonométrique donnée.
- définir de manière stratégique les points de surveillance d'entrée/sortie de la zone d'étude.
- définir stratégiquement un nombre minimum de sections de contrôle à partir desquelles les flux sur les axes routiers qui ne sont pas directement surveillés peuvent être dérivés analytiquement.
- définir des itinéraires aux intersections.

L'exhaustivité des données de trafic relatives à l'ensemble de la zone examinée et en particulier à une station d'enquête phonométrique donnée, telle qu'elle est apparue de manière extensive au cours de l'expérimentation, est une condition nécessaire au développement des modèles de prévision. Si la prédiction du niveau sonore en concomitance avec les phases d'embarquement/débarquement et/ou à la suite des interventions de réorientation est renvoyée à cette station de surveillance, afin que le réseau neuronal s'auto-apprenne, dans l'ensemble de données, la corrélation trafic-bruit pour cette station ne peut pas être brouillée et floue.

5.1.4 L'identification des emplacements de mesure du bruit.

Le choix des stations de relevés phonométriques est particulièrement important. Les points de mesure, généralement de type "source orientée", doivent être représentatifs de la zone d'étude et doivent donc être positionnés stratégiquement par rapport aux sections de relevé des flux de trafic, de manière à corrélérer directement l'émission sonore au trafic de véhicules.

En général, la nature des sources acoustiques à proximité des points de mesure peut être très différente : il peut s'agir de véhicules se déplaçant à vitesse élevée et constante ou de véhicules à faible vitesse et manœuvrant, souvent dans des conditions de trafic congestionné ; il peut également s'agir de conditions de trafic automobile erratique en plus des sources dues aux activités anthropiques (activités commerciales, restauration, divertissement etc...) ou d'autres origines.

Dès ce stade, il est important d'identifier les perturbations possibles provenant de sources autres que le trafic et de positionner les équipements de manière à minimiser les effets, voire à les éliminer. Il est également important de pouvoir discriminer les intervalles de temps dans lesquels ces perturbations se produisent.

Une autre vérification importante concerne la valeur du bruit de fond environnemental, qui doit être suffisamment faible pour ne pas masquer le signal émis par les sources du véhicule.

Cependant, les modèles prédictifs dynamiques nécessitent la capacité de reconnaître le bruit de fond environnemental dans certaines limites.

À l'intérieur de la zone d'étude, les points de relevé phonométrique doivent être des points "frontières", c'est-à-dire des points potentiellement plus exposés au bruit de la circulation que d'autres points plus "internes", de sorte que les mesures d'atténuation puissent être vérifiées et contrôlées en ces points, en supposant que, abstraction faite d'autres facteurs, les effets positifs de l'atténuation puissent également être constatés en d'autres points non directement contrôlés.

Ces aspects pourraient être vérifiés, si nécessaire, par des mesures expérimentales sur des échantillons.

5.1.5 CORRESPONDANCE MESURES DU TRAFIC ET DU BRUIT

Les résultats obtenus à partir du modèle suggèrent tout d'abord la correspondance physique nécessaire entre les matrices des mesures expérimentales du trafic et celles des niveaux de bruit équivalents. L'intervalle de temps de la mesure des paramètres acoustiques et des flux de trafic doit donc coïncider.

Le raffinement du balayage temporel doit être adapté de manière appropriée entre les deux types de mesures afin que les valeurs renvoyées pour chaque intervalle de temps expriment correctement la relation de cause à effet en tenant compte des modes spécifiques de propagation acoustique en champ libre.

Les indicateurs de bruit sur lesquels se base l'analyse sont le niveau équivalent sans filtre de pondération, Leq , et le niveau équivalent avec courbe de pondération A, $LeqA$, ainsi que les valeurs de fréquence correspondantes par bandes de tiers d'octave.

5.1.5.1 Types d'interventions de réduction du bruit

Les interventions de réduction du bruit suite à la gestion et à la régulation du trafic représentent le point de convergence des activités du projet. L'objectif est de développer un système d'infomobilité ITS basé sur des PMV (Panel Message Variable), des APP, des informations web et d'autres systèmes qui transmettent des informations à l'utilisateur de la route en relation avec les flux de véhicules mesurés sur le réseau routier en temps réel. L'objectif du système ITS est de rediriger le trafic, en rationalisant ses itinéraires, notamment pour les flux de véhicules qui ont pour origine et destination le port.

L'analyse des scénarios possibles de réacheminement du trafic doit tenir compte du fait que les caractéristiques des voies d'accès/sortie possibles vers/depuis le port sont invariables. En effet, il n'est pas possible de modifier la largeur des routes en introduisant des facteurs d'augmentation de la capacité ou de créer de nouvelles voies

d'accès au port lui-même. Cette analyse doit partir des résultats locaux de la simulation effectuée sur l'ensemble du réseau routier principal de la ville et après avoir examiné, au moyen de mesures de débit, les niveaux de congestion, les accidents et les possibilités concrètes de redistribution dans les différentes branches d'accès/de sortie vers/depuis le port.

Le système devra indiquer les messages préparés en fonction d'événements programmés (concomitance de plusieurs embarquements/débarquements simultanés de navires, maintenance et interventions sur le système routier, etc.), ou d'événements soudains (accidents sur le système routier menant au port, congestion temporaire des routes, etc.)

Les messages d'information sur la mobilité transmis par les PMV peuvent être intégrés à d'autres outils d'information des utilisateurs, tels que des applications spécifiques ou des services web.

En plus des systèmes d'information des usagers, il est essentiel de fournir un réseau adéquat de détection des flux de trafic. Grâce à une surveillance continue, il sera possible de détecter les conditions critiques (flux de véhicules élevés et donc fortes émissions sonores) et d'envoyer ensuite des messages avec les PMV pour avertir les utilisateurs et réorienter leurs itinéraires. Pour être efficaces, les systèmes de surveillance du trafic doivent être planifiés le long des artères les plus susceptibles d'être encombrées, à la fois sur la base de l'analyse de modélisation et des enquêtes de trafic réalisées et par comparaison directe avec les administrations locales.

5.2 Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision.

Afin de mettre en œuvre des actions de gestion et de régulation du trafic, comme décrit ci-dessus, des modèles d'aide à la prédiction ont été développés. Les modèles, une fois calibrés, permettront de préfigurer certains scénarios de trafic aux heures de pointe de l'embarquement et du débarquement des navires de passagers, d'évaluer les flux (dans ses composantes caractéristiques) sur des sections individuelles du réseau routier et de prévoir les niveaux de bruit associés.

Les modèles ont été testés avec des données de période douce et de période de pointe avec des résultats positifs en termes de pertinence des prédictions et de robustesse des procédures. Le modèle prédictif basé sur les réseaux neuronaux a également été testé avec les données d'entrée d'une autre ville portuaire pour vérifier sa fiabilité. On dispose donc d'une richesse d'observations et d'expériences qui permet d'explicitier des points méthodologiques importants.

La condition nécessaire au développement du modèle neuronal est tout d'abord la **correspondance physique entre les matrices des enquêtes expérimentales sur le trafic et celles des niveaux de bruit** équivalents en l'absence d'autres sources de perturbation pertinentes, selon un balayage temporel congru des données. En d'autres termes, les

données doivent exprimer implicitement une relation de cause à effet.

La présence d'activités génératrices de bruit non directement liées au trafic peut diminuer les performances du réseau neuronal car elle invalide cette relation. Ces contributions doivent être minimisées autant que possible. Si cela n'est pas possible, on peut s'attendre à une certaine dégradation de la performance du modèle dans sa capacité à prédire les tendances pour les périodes où il y a une augmentation significative des activités sonores "extra-traffic". Ces augmentations doivent au moins être reconnues dans les intervalles de temps où elles se produisent.

Dans l'étude pilote pour la ville d'Olbia, la dégradation des performances était cependant marginale par rapport à l'ampleur des perturbations générées par les activités anthropiques à proximité des points de contrôle. Cet aspect a confirmé la capacité du modèle à reconnaître, dans une certaine mesure, le bruit de fond environnemental superposé au bruit de la circulation automobile. Le modèle a permis de prédire des valeurs de Leq,A qui correspondaient aux valeurs mesurées expérimentalement, aussi bien lorsque le signal acquis était quasi-stationnaire que dans des conditions de forte variabilité.

L'ensemble des données relatives au trafic de véhicules et au bruit qui lui est associé doit se référer à un intervalle de temps suffisamment long afin de pouvoir découper les intervalles nécessaires dans la timeline des mesures pour les phases de training, de testing et de validation. Un intervalle de temps minimum de 72 heures peut être considéré, y compris la variabilité typique jour-nuit.

La méthode des réseaux neuronaux se base, en effet, sur une phase préliminaire, appelée " training procedure " selon laquelle le réseau est soumis à l'adaptation de ses paramètres internes dans le but d'apprendre un certain nombre de cas qui constituent l'ensemble d'entraînement. L'ensemble d'apprentissage est identifié à partir d'un certain nombre de réalisations expérimentales des événements sonores qui ont été mesurés tout au long de la période de mesure. Au cours de chaque training step, la réponse correcte (la valeur physique mesurée de la pression acoustique) est utilisée par l'algorithme interne du réseau neuronal pour adapter itérativement ses paramètres dans le but de réduire l'erreur entre le target expérimentale et la réponse fournie par le réseau. Une fois la procédure d'apprentissage terminée, les paramètres internes du réseau sont déterminés numériquement et prennent donc des valeurs constantes qui ne peuvent plus être modifiées.

La stratégie qui a produit des résultats qualitativement meilleurs est appelée " single time span " et repose sur l'identification d'un seul intervalle de temps continu dans la période de mesure, d'une durée suffisante pour garantir que les configurations du trafic et du bruit présentent une dynamique suffisamment importante. Cet intervalle continu est pris en compte pour l'entraînement, tandis que les instants exclus de l'intervalle d'entraînement sont considérés pour la deuxième phase de validation-test. Dans l'étude de cas de la ville d'Olbia, par exemple, avec les données articulées avec un balayage

temporel d'une minute, l'algorithme du réseau neuronal a été défini pour un training set sur un intervalle de 1 400 minutes et de 3 600 minutes pour la phase de testing. Fondamentalement, **il est nécessaire que la phase d'entraînement ait lieu sur un certain nombre d'échantillons statistiquement représentatifs des configurations possibles du trafic et du bruit, c'est-à-dire qu'un ensemble de valeurs comprenant les valeurs maximales et minimales soit déjà présent, ce qui peut se produire plus le contrôle a saisi la gamme de variabilité des quantités examinées.**

En fait, il est bien connu que ce n'est pas une bonne stratégie de tester la capacité du réseau à généraliser avec de nouvelles configurations d'entrée dont les données sont hors de la gamme des entrées avec lesquelles le réseau a été précédemment testé. Dans cette éventualité, à éviter, l'apprentissage pourrait être inefficace ou trop lent.

L'ensemble des données expérimentales du flux de véhicules doit cependant être soumis à une normalisation préalable avant d'être fourni en entrée du réseau. La normalisation est une bonne pratique pour éviter que les valeurs maximales et minimales de test set, qui dépassent les valeurs maximales et minimales de training set, ne provoquent la saturation de la fonction de transfert du réseau.

Un autre aspect qu'il ne faut pas sous-estimer est la nécessité de faire **correspondre correctement les données de trafic des différents tronçons à une station d'étude du bruit donnée.** Dans le cas d'environnements urbains tels que ceux étudiés, les contributions à la détermination des niveaux sonores peuvent être attribuées à différents tronçons de route. C'est le cas des intersections de routes telles que les carrefours, les ronds-points, les carrefours avec des routes surélevées avec différentes rampes d'accès. Il s'agit d'une étude de cas qui s'est également présentée pour la ville d'Olbia : la station de mesure du bruit du rond-point du Sacro Cuore (Pos. A) pourrait être associée à diverses stations de mesure du trafic capables de détecter le passage des véhicules dans les différentes sections de l'infrastructure de jonction voisine vers et depuis le quai du port.

Tout d'abord, il est important de disposer d'une collecte de données aussi complète que possible afin que le réseau exprime les meilleures performances en termes de précision et de matching par rapport aux données expérimentales. Les étapes suivantes peuvent être suivies pour faire correspondre les sections aux points de contrôle. Initialement, le réseau peut être entraîné avec les données d'entrée du flux de véhicules provenant du potentiel d'information complet incorporé dans les sections de route qui ont été surveillées. Les résultats de l'entraînement seront comparés à ceux obtenus par la réduction des données d'entrée due au fait que la section de route la plus éloignée est exclue de l'ensemble d'entraînement. Si les résultats obtenus avec l'ensemble de données réduit ne s'aggravent pas ou ne s'améliorent pas, l'exclusion est définitive et l'ensemble de formation résultant est soumis à nouveau à la réduction et à la comparaison.

Cette procédure appliquée au modèle prédictif de la ville d'Olbia a permis d'identifier

un ensemble de données canonique formé par un nombre minimum de tronçons routiers représentant les sources spécifiques qui déterminent les fluctuations du climat acoustique à proximité de chaque station de mesure phonométrique. Elle a été appliquée à la fois pour les périodes diurnes et nocturnes afin d'éviter la probabilité qu'un tronçon routier donné soit exclu à tort parce qu'il s'est avéré être faiblement corrélé ou redondant avec le climat sonore à un endroit donné, simplement en raison des conditions de trafic contingentes auxquelles le tronçon particulier a été soumis pendant un segment temporel particulier.

En ce qui concerne l'exhaustivité des données de trafic, il est également nécessaire de considérer **l'étendue de la dynamique des réalisations de flux de véhicules** pendant la période de test, un aspect qui doit encore être étudié mais qui affecte le fonctionnement du modèle. La question est de savoir si le réseau généralise les résultats sur une base de données d'entrée dont la variabilité est importante ou non. Une grande variabilité implique que le réseau a été capable d'apprendre sur une base de données «difficile» et importante avec une dynamique élevée. La vérification peut se faire par une analyse statistique des passages de véhicules pour chaque classe et pour chaque section de route.

Les données sur les flux de circulation doivent être traitées telles qu'elles se présentent dans le temps, en subdivisant les véhicules sur la base de leur longueur ou des catégorisations adoptées par la réglementation, y compris la vitesse de chaque véhicule. Les éventuelles procédures de médiation et de normalisation des catégories, par exemple en reliant les véhicules en termes de véhicules équivalents, bien que valables pour l'analyse dans le domaine des transports, produisent un aplatissement des informations et une dégradation conséquente des performances du réseau neuronal. Il est important d'enregistrer l'instant où se produit l'événement de transit dans la section de contrôle afin de saisir la véritable tendance dynamique que le réseau pourra ensuite corrélérer avec les données de bruit sous forme implicite. Les données de transit peuvent alors être rapportées sur des intervalles de temps plus longs. Un modèle de propagation physique ne peut pas représenter cette dynamique puisqu'il suppose que les véhicules caractérisant la source de bruit routier sont libres de circuler.

6. ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE

Pour confirmer et évaluer la cohérence et la répétabilité des résultats obtenus à partir du réseau de neurones développé par UNICA, le projet prévoit une activité de validation spécifique à travers des campagnes spécifiques de mesure et de simulation. C'est pourquoi ARPAT, en accord avec UNICA, a défini un plan de validation précis. Le plan peut se résumer aux phases suivantes :

- réalisation d'une campagne de mesures sur un scénario nouveau sur le réseau (port de Cagliari);
- formation du réseau sur une fraction des données de suivi par UNICA;

- génération d'estimations des niveaux de bruit à travers le réseau de neurones sur la base des données de trafic uniquement, par UNICA;
- simulation du scénario sur un logiciel de prévision classique (SoundPLAN) par ARPAT;
- comparaison des estimations fournies par le réseau de neurones et celles fournies par les logiciels de prévision traditionnels avec les niveaux mesurés lors de la surveillance;
- comparaison du niveau d'incertitude du réseau avec celui fourni par les logiciels traditionnels.

La première étape de la validation a été réalisée en réalisant une campagne de surveillance spécifique dans le réseau routier qui entoure le Vieux-Port et en particulier les régions du Bassin du Ponente et du Bassin Intérieur Port. Contrairement à ce qui est spécifiquement indiqué par UNICA, lors de la phase de suivi, celui-ci a été réalisé séparément pour deux tronçons distincts du réseau. Dans la Figure II.32 une image satellite de la zone est montrée dans laquelle le réseau routier de la ville et les stations de mesure sont mis en évidence.



FIGURE II.32 DETAIL DU RESEAU ROUTIER SURVEILLE AVEC INDICATION DE LA POSITION DES UNITES DE SURVEILLANCE ACOUSTIQUE ET DES COMPTEURS DE TRAFIC. EN VERT LES POINTS DE LA PARTIE « A » DU SUIVI, EN BLEU LES POINTS RELATIFS A LA PARTIE « B » DU SUIVI.

La surveillance a été effectuée pendant une durée continue d'au moins 52 heures chacune. l'enregistrement des niveaux de bruit ambiant et des flux de circulation ainsi que les vitesses divisées par catégories (véhicules légers, poids lourds, motos, etc.).

La phase de collecte de données a été suivie par la formation du réseau de neurones sur la base des données obtenues à partir de la surveillance. ARPAT a fourni à UNICA 100 % des données de trafic et 90 % des données de bruit afin de permettre une validation à l'aveugle. En raison d'un problème technique survenu lors de la phase

d'analyse préliminaire des données réalisée par ARPAT, il n'a pas été possible de former correctement le réseau avec les données de suivi « b » à la date limite du projet. Cependant, ARPAT et UNICA partagent le désir d'achever la validation à une date ultérieure, également afin de publier les résultats dans des revues scientifiques.

UNICA a ensuite formé le réseau et fourni des estimations des niveaux de bruit relatifs à la portion de surveillance pour laquelle il ne disposait que des données de trafic. Cette période correspond à celle écoulée entre le début de la 47^e heure et la fin de la 52^e.

Parallèlement, ARPAT a créé le modèle 3D de la zone d'étude au sein du logiciel SoundPLAN, en insérant les routes surveillées et les flux horaires de trafic associés. A partir d'une fraction des données disponibles, une calibration du modèle a été réalisée en modifiant le type de chaussée associé aux tronçons routiers. Les paramètres ainsi établis ont ensuite été utilisés pour l'ensemble du suivi.

A ce stade, il faut souligner que pour obtenir des estimations horaires des niveaux de trafic à partir des logiciels de prévision traditionnels, il était nécessaire de créer une variante du modèle et donc une simulation spécifique pour chaque heure de surveillance. Par conséquent, le temps requis et la complexité du calcul sont beaucoup plus importants que dans les cas d'utilisation standard pour lesquels le logiciel est conçu.

Une fois les estimations fournies par les deux modèles disponibles, il a été possible de comparer les résultats des deux avec les niveaux de bruit réels. Dans la Figure II.33 à titre d'exemple, les tendances relatives au point Pa3 sont représentées.

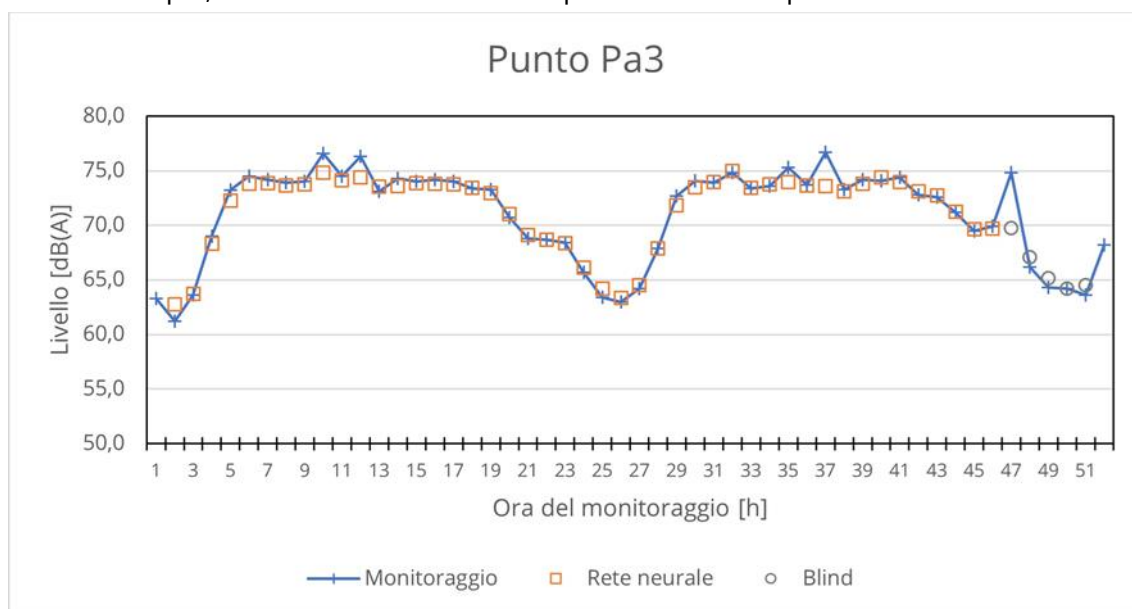
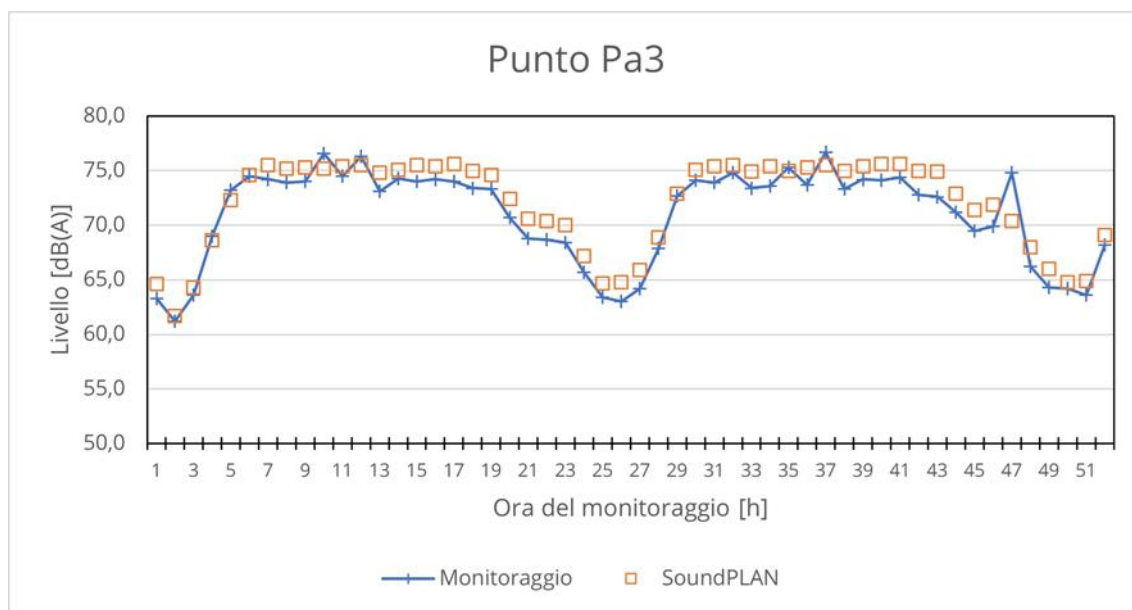


FIGURE II.33: COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS DU SUIVI AU POINT PA3 ET LES PREDICTIONS DU MODELE. CI-DESSUS : EVOLUTION DANS LE TEMPS DES RESULTATS FOURNIS PAR LE RESEAU DE NEURONES, EN GRIS LES ESTIMATIONS FOURNIES SANS CONNAITRE LES NIVEAUX DE BRUIT REELS. CI-DESSOUS : EVOLUTION TEMPORELLE DES RESULTATS FOURNIS PAR LE LOGICIEL SOUNDPLAN.



Comme on peut le voir sur la Figure II.33, généralement, le réseau de neurones est capable de suivre la tendance temporelle du niveau de bruit avec une plus grande fidélité. Les plus grandes différences se produisent généralement à des moments avec des niveaux de bruit plus faibles. Ces périodes de surveillance correspondent à des heures de nuit pendant lesquelles, sur la base des données de trafic, il existe un trafic peu intense mais caractérisé par un pourcentage plus élevé de poids lourds. De manière totalement aléatoire, les heures de surveillance correspondant à la validation à l'aveugle correspondent exactement à l'une de ces périodes, elle doit donc être prise en compte lors de la comparaison des niveaux estimés et réels.

En revanche, les estimations réalisées selon la méthode traditionnelle, bien que produisant en moyenne de très bons résultats, sont généralement moins cohérentes avec la tendance temporelle.

Dans la Table II.9 les résultats sont présentés pour les deux étages testés sur le logiciel SoundPLAN et pour le réseau de neurones.

		Pa1			Pa2			Pa3			
		Moyenne dB(A)	Écart- type	Corr .	Moyenne dB(A)	Écart- type	Corr .	Moyenne dB(A)	Écart- type	Corr .	
Revêtement de sol standard	Étalonnage	-1,5	1,7	0,94	-0,6	1,3	0,98	0,3	0,8	0,99	
	Validation	0,4	1,9	0,47	-0,1	1,1	0,96	0,4	1,6	0,57	
	Aveugle	-1,1	1,1	0,75	-1,3	0,8	0,94	0,2	0,3	0,98	
	Total	-0,8	1,9	0,91	-0,5	1,2	0,97	0,4	1,1	0,97	
Pav. Alternativa	Étalonnage	-0,7	1,6	0,94	0,1	1,2	0,98	1	0,9	0,98	
	Validation	1,5	1,8	0,48	0,5	0,9	0,96	1	1,5	0,57	
	Aveugle	-0,2	1,2	0,74	-0,3	0,6	0,97	1,3	0,5	0,96	
	Total	0,2	1,9	0,9	0,2	1,1	0,98	1	1,1	0,96	
Rete neurale		Entraînement	-0,3	0,8	0,98	0	0,5	0,99	-0,3	0,7	0,99

	Test	-0,1	0,9	0,97	0	0,5	1	-0,2	0,8	0,98
	Aveugle	1,6	1,2	0,92	1,1	1,1	0,77	0,5	2,3	0,95
	Total	0,4	1	0,97	0,1	0,7	0,99	0,3	1	0,97

TABLE II.9 RESUME DES RESULTATS DE LA VALIDATION.

Les travaux réalisés montrent que, malgré l'énorme charge de travail nécessaire, les logiciels traditionnels ne sont pas adaptés pour fournir des estimations horaires ou même à des intervalles plus courts, alors qu'ils fournissent des résultats d'une fiabilité prouvée sur des intervalles de temps beaucoup plus longs. D'autre part, le modèle traditionnel permet la création de cartes de bruit 2D en une seule session de calcul, tandis que le réseau ne fournit des estimations que sur les récepteurs identifiés et pour lesquels il a été entraîné.

Le réseau de neurones développé s'est avéré capable de fournir des estimations de niveaux de bruit avec une erreur comparable à celle d'un logiciel certifié en ce qui concerne les mesures effectuées sur le terrain, mais avec une énorme économie en termes d'effort de calcul et de travail humain si l'intérêt spécifique est de vérifier certains récepteurs. Les deux modèles sont nés avec des finalités différentes, en particulier le réseau de neurones veut répondre au besoin de gestion en temps réel du trafic urbain, afin de surveiller les niveaux de bruit aux points critiques à des intervalles courts, voire 1 minute. Le modèle de réseau de neurones n'est donc pas né pour remplacer le modèle conventionnel, au contraire, il pourrait être utilisé pour le soutenir.

SECTION III. ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DES ACTIVITÉS PORTUAIRES DE MANUTENTION DES MARCHANDISES ET DES PERSONNES DANS L'HYPOTHÈSE DES NOUVEAUX TRANSPORTEURS DE PROPULSION D'ÉNERGIE

1. INTRODUCTION

Les activités menées par l'Université de Pisa (Département de l'ingénierie de l'énergie, des systèmes, du territoire et de la construction avec le Département de physique) concernaient l'analyse des émissions sonores des activités portuaires pour la manutention des marchandises et l'élaboration de modèles/scénarios de la sources dans l'hypothèse d'utiliser de nouveaux vecteurs énergétiques pour alimenter les systèmes de propulsion.

L'étude de cas examinée était la zone du terminal portuaire de Toscane (TDT) du Port de Livorno, où une campagne de mesures a été élaborée (en collaboration avec la Direction du Développement et de l'Innovation de l'Autorité Portuaire et avec le Responsable HQSE du TDT Company Office) concernant les principales activités bruyantes de manutention de marchandises avec des véhicules routiers à moteur diesel

(par exemple, les reachstakers, les transtainers et les grues de quai). Les mesures acoustiques ont été répétées pour caractériser les différentes conditions de travail (e.g. manutention de chargement/déchargement de conteneurs, manœuvres de véhicules, attente en stand-by) et les différentes conditions de contexte (e.g. coexistence de sources multiples, travail simultané, transit de véhicules). 42 mesures acoustiques ont été réalisées, d'une durée de 3 à 30 minutes, pour un total de 600 minutes de mesure, incluant plusieurs événements sonores d'intérêt, ainsi que des enregistrements audio/vidéo et un répertoire photographique. Les activités de post-traitement ont été réalisées à différents niveaux de détail : étude de l'événement global ; étude des macro-événements au sein de l'événement global ; étude des événements significatifs pour chaque macro-événement ; étude du spectre d'émission sonore lié à des événements significatifs. La recherche s'est poursuivie avec la modélisation de sources sonores importantes et de scénarios possibles. Les émissions sonores de véhicules électriques similaires ont été analysées et les sources respectives modélisées. Ceci a permis d'estimer les niveaux sonores dans l'hypothèse d'un vecteur électrique d'alimentation des systèmes propulsifs des moyens de manutention actuels et d'estimer la réduction des émissions sonores par rapport à l'état actuel.

Les résultats de la recherche peuvent être résumés comme suit : création d'une base de données des mesures phonométriques des événements sonores enregistrés ; description de l'évolution temporelle et des spectres fréquentiels des événements sonores enregistrés ; modélisation des événements les plus significatifs à l'aide d'un logiciel dédié ; modélisation de scénarios possibles considérant le passage à un vecteur électrique.

L'analyse menée nous permettra de définir les meilleures stratégies communes de réduction des nuisances sonores en zone portuaire, contribuant au développement durable des ports de commerce et des plateformes logistiques.

2. RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.3.1

La zone du Terminal Darsena Toscana (zone TDT) du port de Livorno est directement reliée à l'autoroute Firenze-Pisa-Livorno et est située au nord de la ville de Livorno (Figure III.1). La zone a une superficie totale de 389 000 m² (longueur de quai 1 430 m, profondeur sous le quai 13 m), le terminal ferroviaire a une superficie de 49 500 m² (longueur de voie 1 350 m), le terminal frigorifique a une superficie de 17 900 m². Selon les données publiées relatives à l'année 2018, un total d'environ 37 millions de tonnes de marchandises ont été traitées.

La zone TDT est organisée comme suit (Figure III.2-3) : entrée près de la porte des douanes, cour principale, pour la manutention des conteneurs (où se trouvent également les bureaux), quai, utilisé pour le chargement/déchargement des conteneurs après le transport maritime, ligne de chemin de fer, utilisée pour le chargement/déchargement des conteneurs après le transport terrestre.

2.1 Mesures acoustiques in situ

Les mesures acoustiques in situ dans la zone TDT ont été convenues avec l'Autorité Portuaire de Livourne (Département Développement et Innovation) et avec la Société TDT (HSQE Manager Office). En particulier, les jours et horaires suivants ont été identifiés en accord avec le Responsable TDT HQSE : jeudi 3 octobre 2019, vendredi 4 octobre 2019, mercredi 9 octobre 2019, vendredi 11 octobre 2019, toujours en journée sur la tranche horaire du matin à partir de 7 :30 h à 13 h 30, pour un total de 24 heures. Les mesures de niveau sonore concernaient des événements sonores liés à : une grue à quai (Figure III.4A), un reach stacker (Figure III.4B), un transtainer de ligne ferroviaire (Figure III.4C), un transtainer de cour principale (Figure III.4D) et un transtainer réfrigéré conteneur (Figure III.4E).

Les mesures acoustiques ont été répétées pour caractériser les différentes conditions de travail (par exemple : manutention des conteneurs dans les phases de chargement et de déchargement, manœuvre de véhicules par route, attente en stand-by, ...) et les différentes conditions de contexte (par exemple : coexistence de plusieurs sources sonores, fonctionnements simultanés, passage de véhicules à proximité, ...), en fonction de la position dans la zone TDT (place principale, quai, voie ferrée). Pour être complet, des mesures de bruit environnemental ont été réalisées, notamment : dans la zone devant les bureaux TDT (Figure III.4F), près de la porte des douanes (Figure III.4 G), dans la zone Pré-Gate près de la barrière automatique pour les véhicules entrants (Figure III.4H).

Grâce à cette activité, les variations temporelles et fréquentielles des niveaux de pression acoustique des événements examinés ont été acquises à des fins de post-traitement et d'interprétation dans le cadre des objectifs généraux du projet REPORT.

2.2 Matériel utilisé et opérateurs

Les activités de mesure in situ ont été menées avec l'instrumentation du Laboratoire d'éclairage et d'acoustique (LIA) du Département d'ingénierie énergétique, des systèmes terrestres et de la construction (DESTeC) de l'École d'ingénierie de l'Université de Pisa: analyseur portable bi-canal Brüel&Kjær, type 2270 (avec étalonnage valide), pare-brise Brüel&Kjær de 90 mm avec détection automatique, trépied Brüel&Kjær pour analyseur portable. Ont également été utilisés : télémètre laser pour mesurer les distances auxquelles les sources de bruit et caméra vidéo GoPro Hero7 Silver pour l'enregistrement audio/vidéo des événements sonores examinés. Pour le post-traitement ultérieur des mesures acoustiques acquises, le logiciel dédié a été utilisé Suite BZ5503 fourni avec l'instrumentation Brüel&Kjær. Les mesures ont été effectuées par des opérateurs qualifiés de l'Université de Pisa, toujours accompagnés d'un ou deux agents de sécurité de la TNT qui ont indiqué les positions à prendre lors des mesures, portant les équipements de protection individuelle nécessaires.



FIGURE III.1 – ÉTUDE PHOTOGRAPHIQUE DE LA ZONE TDT, PORT DE LIVORNO

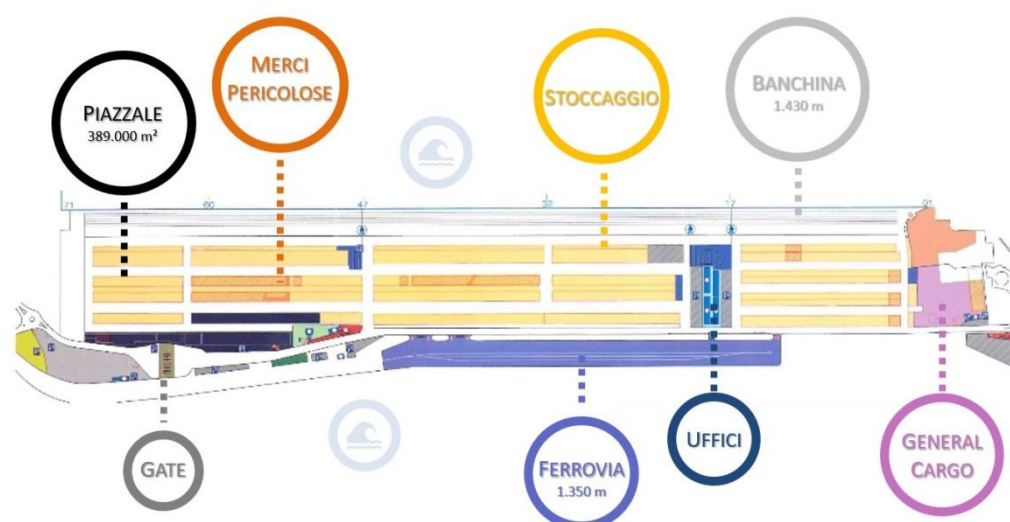
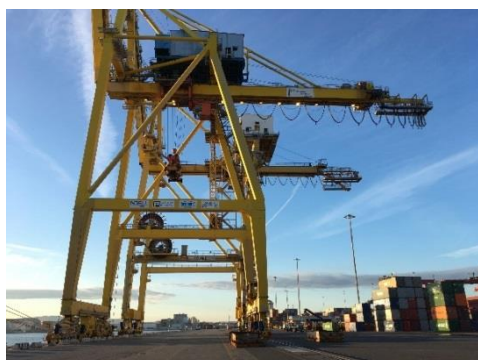


FIGURE III.2 – PLAN SCHEMATIQUE DE LA ZONE TDT, PORT DE LIVORNO.



FIGURE III.3: EXEMPLE D'EQUIPEMENT DE MANUTENTION ET DE PARC A CONTENEURS



(A)



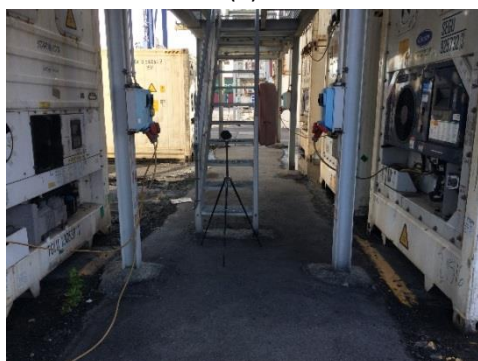
(B)



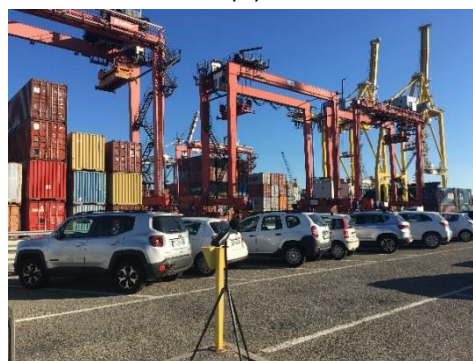
(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)

FIGURE III.4 – PORT DE LIVORNO, SOURCES DE BRUIT DANS LA ZONE TDT : (A) GRUE DE QUAI, (B) REACH STACKER, (C) TRANSTAINER, COTE CHEMIN DE FER, (D) TRANSTAINER, COTE COUR PRINCIPALE, (E) CONTENEUR REFRIGERE. BRUIT AMBIANT : (F) BUREAUX DE LA TDT, (G) PORTE DES DOUANES, (H) ZONE DE PRE-GATE.

2.3 Matériel acquis et post-traitement

Au total, 42 mesures de niveau sonore ont été effectuées, d'une durée de 3 à 30 minutes, pour un total de plus de 600 minutes de mesure, incluant plusieurs événements sonores d'intérêt (parfois séparés avec des preuves se chevauchant parfois pour la contemporanéité). Ces mesures étaient accompagnées de 37 enregistrements audio (à l'exception de certaines mesures de bruit environnemental) et de 30 enregistrements vidéo des événements en cours (à l'exception de certaines mesures de bruit environnemental), ainsi que de divers documents photographiques.

L'activité de post-traitement a été réalisée sur quatre niveaux de détail (Figures III.5-III.8, qui montrent les opérations réalisées par un véhicule à portée de main pour le stockage d'un conteneur) :

- étude de l'événement global,
- étude des macro-événements identifiés au sein de l'événement global,
- étude des événements significatifs identifiés pour chaque macro-événement,
- étude du spectre d'émission sonore lié à des événements significatifs.

Chaque mesure a été cataloguée avec un code alphanumérique indicatif de la source observée (par exemple GB-01-A-10) composé comme suit :

- 2 caractères alphabétiques représentant la source (dans l'exemple : GB) et 2 caractères numériques dans l'ordre chronologique d'acquisition de la mesure (dans l'exemple : 01) pour l'événement global;
- 1 caractère alphabétique pour le macro-événement (dans l'exemple : A);
- 2 caractères numériques pour l'événement significatif (dans l'exemple : 10).

Le Table III.1 présente les abréviations utilisées pour les sources, le nombre de mesures effectuées et les fiches de mesures relatives à l'activité de post-traitement. A noter que, dans le tableau, lorsque le nombre de « cartes de mesure » est inférieur au nombre de mesures, cela signifie que le post-traitement de ces mesures effectuées pour l'essai et considérées comme non significatives pour la courte durée ou pour le type a événement enregistré.

ID	Sorgenti di rumore		
	Sorgente	N° misura	N° schede
GB	Gru da banchina	2	2
RS	Reach Stacker	7	6
TSf	Transtainer (lato ferrovia)	8	7
TSp	Transtainer (lato piazzale principale)	14	12
CF	Container frigo	2	2

ID	Rumore ambientale		
	Sorgente	N° misura	N° schede
RA	Rumore ambientale	4	4
G	Gate doganale	1	1
PG	Pre-Gate	4	4

Totale misure effettuate	42
Totale schede di misura	38

TABLE III.1 ACRONYMES UTILISES, NOMBRE DE MESURES EFFECTUEES ET NOMBRE DE CARTES PAR SOURCE

L'ensemble de l'activité menée et les principaux résultats des activités de post-traitement des mesures effectuées (ventilés par type de source sonore et organisés en tableaux et graphiques pour une lecture immédiate) sont rapportés: dans le **'Document de synthèse'** concernant le *'Activités de mesure acoustique menées afin de caractériser l'émission sonore de certaines sources de bruit en action dans le port de Livourne pour la manutention de conteneurs'*, dans les **'Fiches de mesures'** qui font partie intégrante du Document de synthèse, structurées en quatre parties pour un total de 600 pages et organisées de manière à ce que chaque feuille puisse être extraite séparément, avec toutes les informations essentielles pour la post- traitement des mesures acoustiques effectuées, et enfin dans le **'Post-processing document'** qui décrit le post-traitement des mesures afin de décrire les différents événements sonores observés in situ et modéliser les sources sonores actives dans la zone d'étude pour une exploitation ultérieure des résultats obtenus en acoustique environnementale logiciel de modélisation.

Les documents cités, élaborés en italien et en français, ont été insérés en version pdf dans le portail en ligne du projet REPORT.

Le post-traitement des mesures a été réalisé afin de schématiser les différents événements sonores observés in situ et modéliser les sources sonores actives au port de Livourne pour une exploitation ultérieure des résultats obtenus dans un logiciel de modélisation acoustique environnementale.



FIGURE III.5: ESEMPIO DI PROCEDURA DI MISURA E POST-ELABORAZIONE (STEP 1)

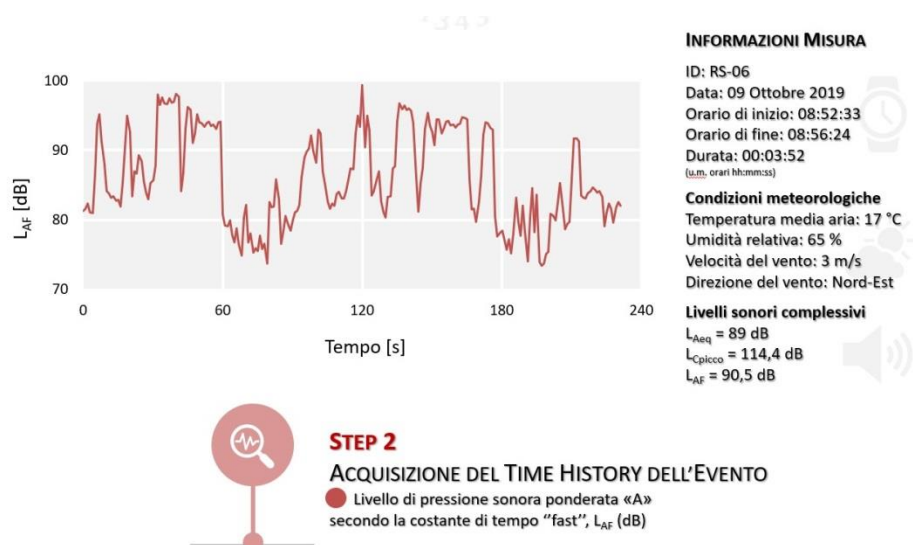


FIGURE III.6: ESEMPIO DI PROCEDURA DI MISURA E POST-ELABORAZIONE (STEP 2)



FIGURE III.7: ESEMPIO DI PROCEDURA DI MISURA E POST-ELABORAZIONE (STEP 3)

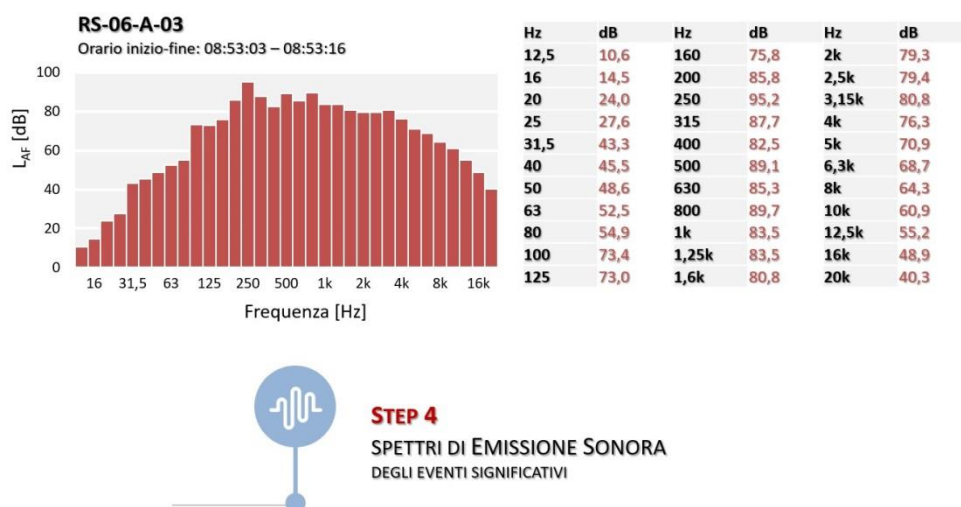


FIGURE III.8: ESEMPIO DI PROCEDURA DI MISURA E POST-ELABORAZIONE (STEP 4)

Enfin, l'estimation des niveaux de puissance acoustique des sources sonores examinées a été réalisée au préalable à l'aide d'une version simplifiée de la formule de propagation du son dans le milieu extérieur, en négligeant les différents effets d'atténuation acoustique dus aux facteurs environnementaux, dont certains peuvent en réalité être négligé. Les niveaux de puissance acoustique sont bien entendu calculés à partir des niveaux de pression acoustique mesurés avec l'instrumentation phonométrique utilisée.

2.4 Modèles d'émission sonore des nouveaux systèmes de propulsion

À partir des mesures acoustiques effectuées dans la zone Terminal Darsena Toscana du port de Livorno, les niveaux de puissance acoustique ont été calculés, en bandes de tiers d'octave. 362 spectres sonores relatifs à des niveaux de puissance acoustique ont ensuite été traités, en bandes de tiers d'octave, dans la gamme de fréquences 12,5 Hz ÷ 20 kHz, représentatif des nombreux événements sonores identifiés, et une archive interactive a été réalisée sous forme de fichier Excel (accompagnée d'un petit guide de consultation de l'archive). Enfin, un modèle numérique de la zone terminale de Darsena Toscana a été élaboré à l'aide du logiciel 'iNoise' version 2021, qui implémente le modèle de calcul ISO 9613 dans les bandes de tiers d'octave.

En ce qui concerne la morphologie de la Darsena Toscana, la shapefile géoréférencées relatives au terrain et aux bâtiments, disponible auprès du service cartothèque SITA de la Région Toscane, les bâtiments ont reçu la hauteur correspondante indiquée dans les fichiers de la Région Toscane, des coefficients de réflexion acoustique de référence ont été attribués aux bâtiments et au sol. Les sources ont été modélisées comme des sources mobiles et une trajectoire a été définie pour chacune à partir de photographies satellites et à partir de documents photographiques et vidéos réalisés lors des activités de mesure. Conformément au décret législatif 194/2005, qui transpose la directive

européenne 49/2002, le paramètre utilisé pour les simulations acoustiques est L_{DEN} . Les résultats complets de la **'Analyse avec software'**, élaborés en italien et en français ont été inclus en version pdf dans le portail en ligne du projet REPORT, en particulier, la modélisation des événements sonores significatifs identifiés lors des mesures a d'abord été réalisée de manière simplifiée avec le logiciel iNoise, software open source DGMR (Figure III.9) puis par la suite avec le software SoundPlan.



FIGURE III.9: ESEMPLIFICAZIONE DI MODELLAZIONE CON SOFTWARE I-NOISE

2.5 *Estimations de la réduction des émissions sonores dues aux activités portuaires dans des scénarios avec différents degrés de pénétration des nouveaux dispositifs*

Lors de la validation avec le software SoundPlan pour chaque véhicule de manutention (machine d'exploitation) les activités pouvant être électrifiées et non électrifiées ont été identifiées. Cela a été utile pour affecter divers « groupes » au modèle, schématisant ainsi différents scénarios. A noter que la hauteur de la source est un facteur à ne pas négliger. Regrouper le cycle de fonctionnement en une seule source sous-estimerait l'émission des sources positionnées à des hauteurs différentes. Le tableau montre un exemple des principales sources de bruit : GB (dock crane), RS (reach-staker), TSP (yard side transtainer). Afin de répartir les sources dans la zone, le Terminal Darsena Toscana a été divisé en sous-zones dans lesquelles fonctionnent les machines d'exploitation

présentes. En particulier, ils étaient considérés: 13 Reach-Stacker, 7 Grue de quai, 1 Transtainer côté rail, 12 Transtainer côté parvis. En utilisant QGIS, il était possible de placer les sources dans la bonne position et d'attribuer des attributs individuels à chacune. 9675 sources ont été positionnées qui sont importées dans le logiciel de calcul avec lequel il sera possible de réaliser des simulations de propagation du bruit. Pour chaque source ont été attribués : niveau d'émission sonore, profil horaire d'exploitation (102 niveaux d'émission sonore et 29 scénarios horaires d'exploitation). Le modèle de calcul a été créé en important des courbes de niveau, des points d'élévation et des profils routiers. En chargeant les fichiers de formes créés avec QGIS, toutes les sources ont été importées dans la bonne position et les caractéristiques acoustiques, les caractéristiques de fonctionnement et la hauteur par rapport au sol ont été attribuées. Chaque source s'est vu attribuer son propre groupe de membres (électrifiés, non électrifiés, unités de réfrigération). Des simulations ont été réalisées et des cartes de bruit ont été produites (Figure III.10-15) pour les différents groupes dans les intervalles de temps établis au niveau européen (Directive 2002/46/CE) : L_{DEN} (niveau jour-soir-nuit), niveau jour L_{day} (06h00 - 20h00), niveau soirée $L_{evening}$ (20h00 - 22h00), niveau nuit L_{night} (22h00 - 06h00).

En particulier, il est montré dans la comparaison Figure III.15 comment l'amélioration (exprimée en dB) est contenue dans l'hypothèse de moteurs électriques remplaçant les moteurs à propulsion traditionnelle, cependant l'analyse, étendue à cette zone portuaire importante, est particulièrement intéressante pour la méthodologie adoptée et la répétabilité de la procédure dans les zones portuaires et les terminaux de fret ayant des caractéristiques similaires.

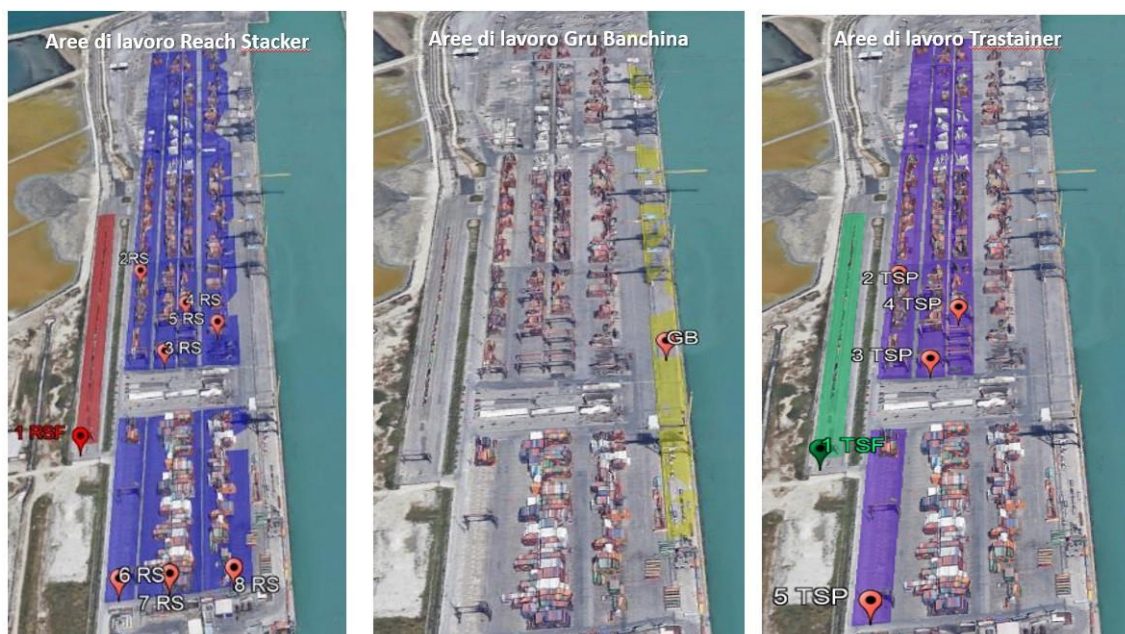


FIGURE III.10: SCHEMATIZZAZIONE AREE DI LAVORO MACCHINE OPERATRICI

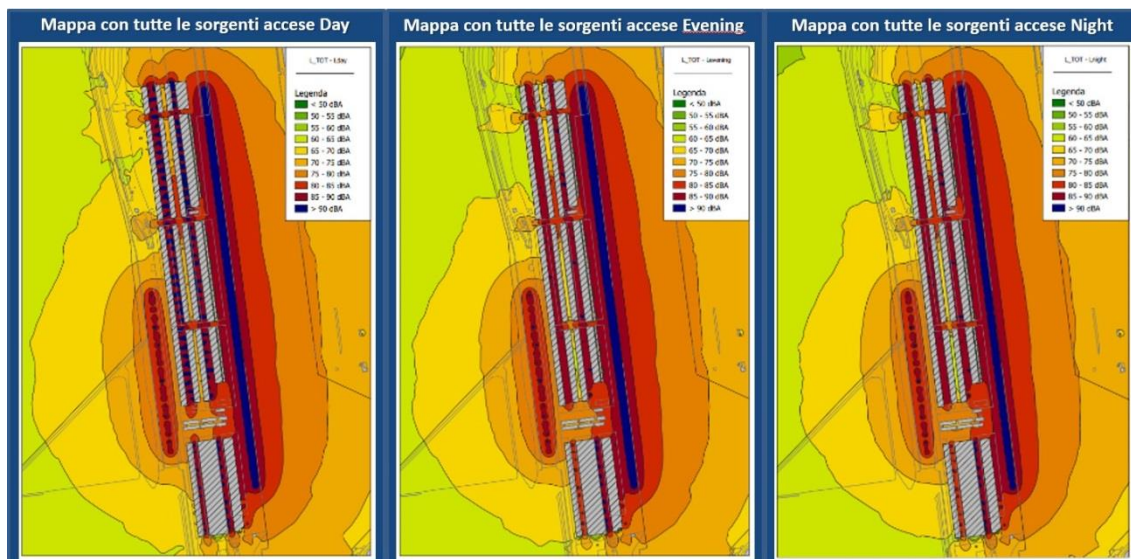


FIGURE III.11: SINTESI GRAFICA RISULTATI SOUNDPLAN (MAPPE ISOLIVELLO CON TUTTE LE SORGENTI ATTEVE)

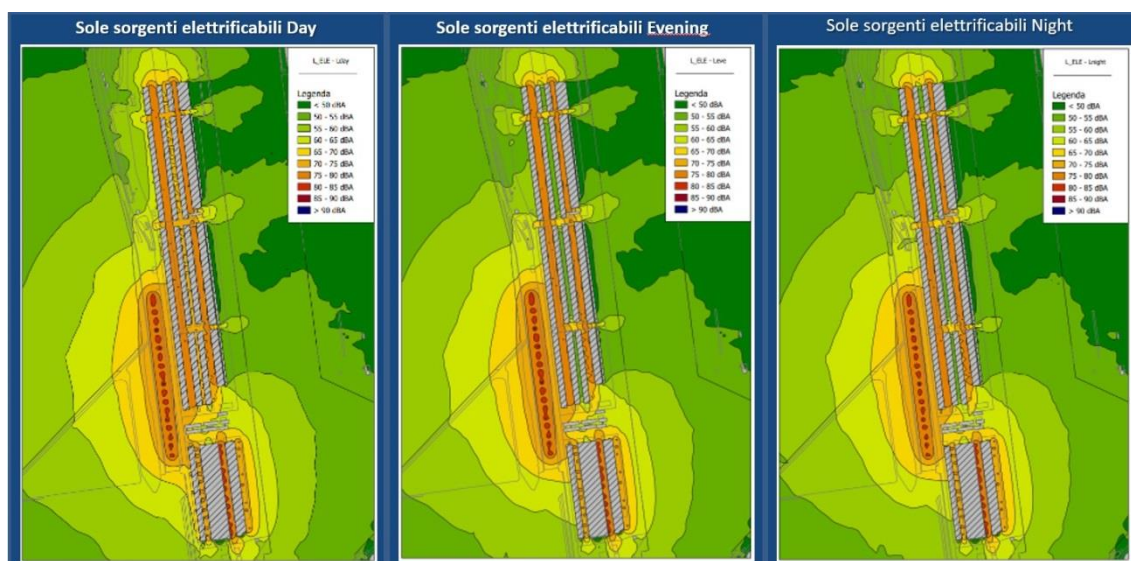


FIGURE III.12: SINTESI GRAFICA RISULTATI SOUNDPLAN (MAPPE ISOLIVELLO CON SORGENTI ELETRIFICABILI)

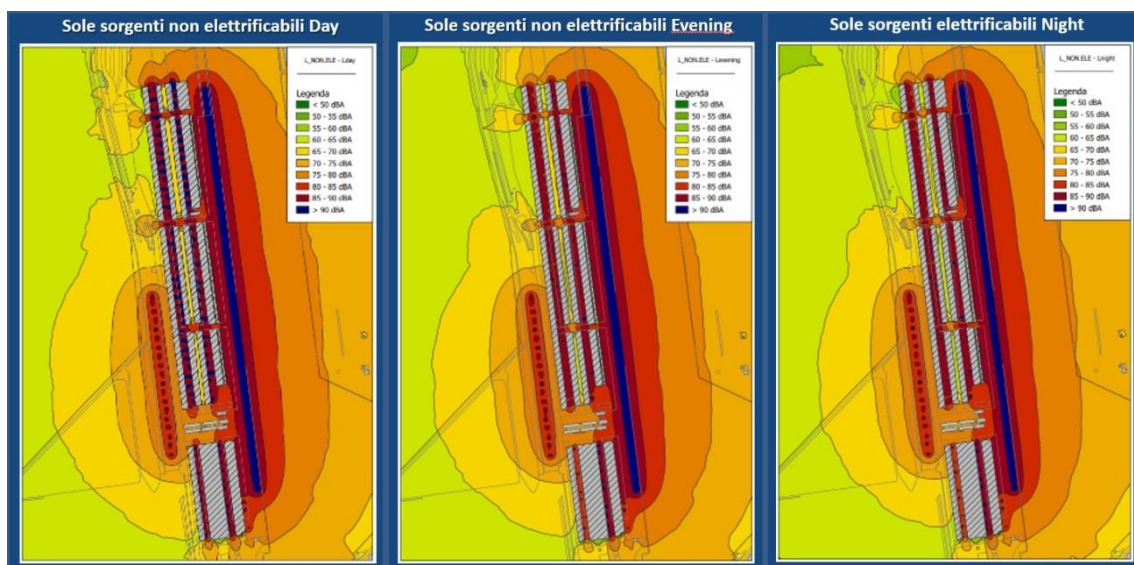


FIGURE III.13: SINTESI GRAFICA RISULTATI SOUNDPLAN (MAPPE ISOLIVELLO CON SORGENTI NON ELETTRIFICABILI)

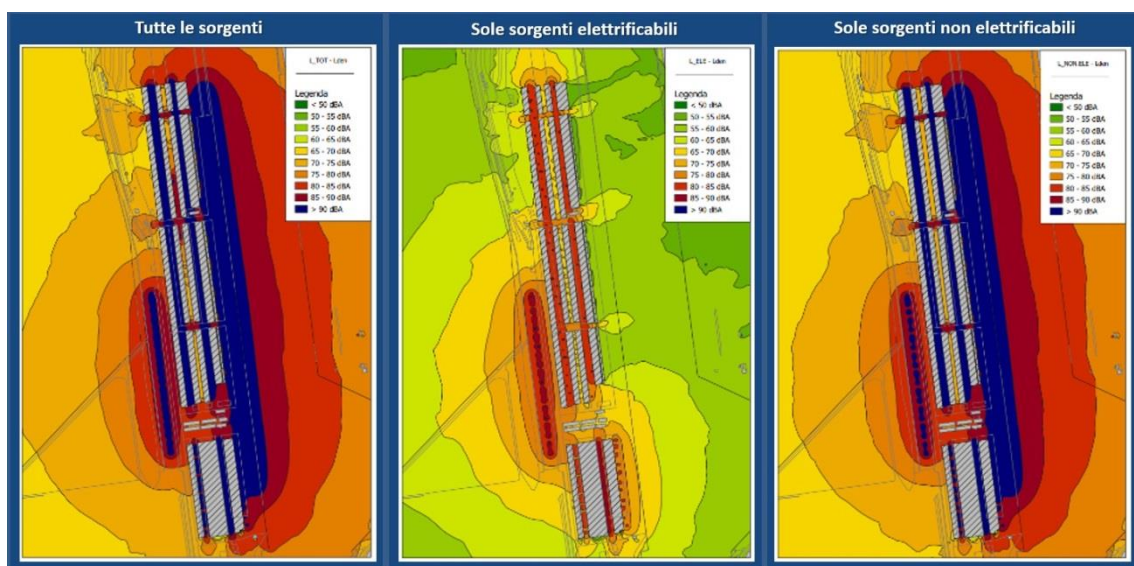


FIGURE III.14: SINTESI GRAFICA RISULTATI SOUNDPLAN (MAPPE ISOLIVELLO DI CONFRONTO)



FIGURE III.15: SINTESI GRAFICA RISULTATI SOUNDPLAN (MAPPE ISOLIVELLO DI CONFRONTO)

3. ÉLÉMENTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES LIGNES DIRECTRICES

3.1 *Vademecum / méthodologies d'application des méthodes de prévision.*

Les phases précédentes d'Analyse des émissions sonores des activités portuaires pour la circulation des marchandises et des personnes, Vérification Expérimentale, Modélisation et Validation des modèles, ont été développées à travers une série complexe d'activités qui impliquaient notamment:

- enquête sur les activités de manutention de marchandises avec des véhicules à moteur; identification des sources sonores les plus significatives;
- mesures phonométriques in situ des émissions sonores de chaque source identifiée;
- post-traitement des résultats des mesures afin de caractériser l'émission sonore des sources individuelles;
- formulation des hypothèses de remplacement du système de propulsion des véhicules automobiles (du moteur thermique au moteur électrique);
- simulation de la propagation sonore d'émissions bruyantes vers des récepteurs sensibles, à l'état actuel et simulé (véhicules à moteur électrique).

En particulier, les activités menées lors des phases précédentes ont permis de:

- créer une base de données des émissions des sources de bruit typiquement présentes dans les ports, mais dont peu de données sont disponibles dans la littérature technico-scientifique;
- subdiviser l'émission sonore en une série détaillée de sous-opérations que la source (typiquement un véhicule automobile impliqué dans la

manutention de marchandises) effectuée de manière répétitive, cela a permis de mettre en évidence les sous-opérations les plus émettrices de bruit et de caractériser leur analyse en fréquence;

- évaluer l'importance des émissions sonores produites par les composants impactants de la manutention des marchandises (conteneurs) par rapport à celles du moteur à combustion du véhicule unique;
- simuler le remplacement (en termes d'émissions sonores) du moteur thermique du véhicule par un moteur électrique, en laissant les autres composants inchangés;
- évaluer l'ampleur de la réduction des émissions sonores due à ce remplacement dans la zone portuaire et vers les récepteurs sensibles, ce montant était plutôt modeste compte tenu de la prévalence des émissions sonores dues aux composants impactants dans le mouvement des marchandises.

SECTION IV. EVALUATION DES COUTS SOCIAUX ASSOCIES A LA POLLUTION SONORE DANS LES PORTS

1. INTRODUCTION

La pollution sonore, c'est-à-dire un niveau de bruit élevé ou dérangeant dans une zone donnée, est devenue un problème environnemental important pour de nombreuses autorités portuaires en Europe et en Amérique du Nord. L'objectif de cette partie était d'évaluer les coûts sociaux associés à la pollution sonore dans les ports. Pour cela, nous utilisons une approche basée sur la méthode d'évaluation contingente afin d'étudier l'impact du bruit dans les ports de trois villes, à savoir Bastia (France) et Gênes et Livourne (Italie), nous permettant d'évaluer le consentement à payer (CAP) de la population pour des mesures de réduction de cette pollution sonore. Les estimations du CAP sont obtenues à partir d'un échantillon représentatif de résidents locaux, à savoir 400 entretiens dans chaque ville. Les personnes interrogées sont invitées à écouter deux échantillons de bruit de 50 et 40 décibels respectivement, représentant un niveau standard pour des activités portuaires. Ils expriment ensuite leur CAP pour la variation du niveau de bruit mentionnée ci-dessus. L'expérience montre que le CAP des résidents varie considérablement en fonction de leur localisation et de facteurs individuels. Certaines implications normatives, en termes de politiques publiques, sont enfin brièvement évoquées.

2. SOMMAIRE DU PRODUIT T2.4.1

L'objectif général à long terme du Projet REPORT est d'atténuer les émissions sonores des ports dans le domaine de la coopération transfrontalière afin de rendre les infrastructures portuaires de l'espace maritime plus durables. Une évaluation des coûts sociaux supportés par les résidents en raison de la pollution sonore à proximité des ports a été réalisée. L'objectif de cette enquête était d'interroger sur la base de questionnaires en face à face, réalisés à partir de la méthode d'évaluation contingente, des résidents de la commune.

Le travail a été réalisé en deux étapes:

Afin de réaliser le questionnaire, des entretiens semi-dirigés ont été menés auprès de personnes compétentes dans les villes portuaires sélectionnées afin de valider une première version du questionnaire. L'objectif poursuivi à travers ces entretiens et ce groupe de discussion était d'acquérir des informations sur la pollution sonore dans les villes portuaires sélectionnées, en essayant de faire ressortir les éventuelles problèmes critiques et les différences observables dans les différents ports. Trois entretiens auprès d'experts ont été menés, un par ville portuaire de l'étude. Afin d'avoir un spectre d'expertise le plus large possible un représentant d'une entreprise privée d'une compagnie maritime opérant sur les trois régions (Corse, Toscane et Ligurie) dans

lesquelles se situent les villes portuaires de l'étude a été interrogé à Bastia. Deux représentants d'organismes publics ont été enquêtés dans les deux autres villes portuaires de l'étude : un représentant, en charge du dossier de la pollution sonore au sein de la Commune de Gênes et un représentant de l'autorité portuaire à Livourne. Enfin, afin de bénéficier d'une expertise technique concernant la pollution sonore, un groupe de discussion a été organisé auprès d'experts acousticiens de l'Université de Gênes.

Ces entretiens auprès d'experts et ce groupe de discussion constituaient un préalable indispensable à l'élaboration du questionnaire destiné à un échantillon représentatif de résidents permettant d'identifier le coût social associé à la pollution sonore dans les ports, questionnaire qui constitue le produit T2.4.1 « Questionnaire d'enquête » du Projet REPORT.

Ils nous ont également permis de déterminer dans quelles zones les questionnaires devaient être administrées. A Gênes, ils ont été administrés dans le Municipio II Genova Centro Ovest ; à Livourne dans les quartiers Venezia et San Marco - Circoscrizione 2 ; et à Bastia du quartier Saint-Joseph jusqu'à Toga

La deuxième étape consistait dans l'administration des questionnaires par différents prestataires en face à face selon la méthode des quotas. Le nombre de questionnaire attendu était de 400 au minimum. Ce questionnaire était constitué de trois parties distinctes.

Dans la première partie, nous nous sommes intéressés au lieu de vie des répondants ainsi qu'à la sensibilité face aux nuisances sonores. Ainsi, 23 questions nous ont permis de déterminer l'intensité de la sensibilité des personnes interrogées vis-à-vis du bruit du port.

La deuxième partie consistait en un scénario dans lequel était proposé aux personnes interrogées de payer une somme d'un montant aléatoire (suivant une loi uniforme) compris entre 1 et 50 euros pour obtenir une réduction de 10 décibels du niveau de bruit, le niveau de bruit passant de 50 à 40 décibels à l'intérieur de l'habitation. Une écoute de deux échantillons sonores de 20 secondes leur était proposée. Le vecteur de paiement consistait en une nouvelle, identique pour tous les foyers fiscaux, et les montants collectés étaient exclusivement destinés à financer l'électrification des quais (mise en place et entretien des bornes d'alimentation électrique). Cette partie nous a permis de déterminer un CAP pour les habitants des villes portuaires sélectionnées et a fait l'objet du produit T2.4.2.

La dernière partie du questionnaire comprenait le profil du répondant.

Projet REPORT « Rumore e Porti »

Questionnaire n° _____

Dans le cadre d'un projet européen Marittimo, nous réalisons une étude afin d'évaluer les coûts sociaux supportés par les résidents en raison de la pollution sonore à proximité des ports. En effet, les ports sont sources d'un ensemble de nuisances. Nous nous intéressons exclusivement dans notre étude aux sources de pollution sonore (bruit provenant des bateaux, embarquement, ...). Cette nuisance sonore entraîne des coûts, notamment des impacts sur la santé (troubles du sommeil pouvant provoquer des accidents de la route, gêne, maladies cardiovasculaires, difficulté de concentration qui peuvent conduire comme l'ont montré des études à des retards d'apprentissage de la lecture chez certains enfants). L'enquête est totalement anonyme, dans un but uniquement scientifique. Pourriez-vous nous accorder quelques instants pour répondre à notre questionnaire ?

Partie 1 : Votre résidence et la pollution sonore :

Nous allons commencer par vous poser quelques questions sur l'environnement dans lequel vous vivez.

1. Résidez-vous bien à l'année à Livourne/Bastia/gênes ? (Si la personne ne réside pas dans une de ces villes, ne pas administrer le questionnaire.)

Si réponse ville de l'étude :

2. Dans quel quartier : _____
A quelle adresse ? _____
3. Etes-vous :
☐ Propriétaire ☐ Locataire ☐ Logé à titre gratuit
4. Habitez-vous dans :
☐ Une maison
☐ Un appartement ; si oui, à quel étage : _____
☐ Un autre type d'habitation ; spécifiez : _____
5. De quel type de vitrage, votre habitation est-elle équipée dans la partie la plus exposée au bruit ?
☐ Simple vitrage
☐ Double vitrage
☐ Triple vitrage

La coopération au cœur de la Méditerranée

1

FIGURE V.1: PAGE 1 DU QUESTIONNAIRE

3. SOMMAIRE DU PRODUIT T2.4.2

Malgré l'importance de la pollution sonore des ports, à notre connaissance, aucun travail portant sur ce type de pollution n'a été réalisé en Economie. Cette étude vise notamment à combler ce manque. Pour ce faire, nous proposons une expérience basée sur une étude menée dans trois ports (Bastia, Livourne et Gênes). Ce travail permet d'estimer les coûts sociaux générés par la pollution sonore. Le coût social correspond au CAP des personnes associé à une réduction donnée des niveaux de bruit. En outre, nous mettons en corrélation ce CAP avec un certain nombre de facteurs environnementaux et individuels afin d'établir lesquels sont les plus significatifs pour déterminer les coûts sociaux associés au bruit en zone portuaire. Cette méthode permet également de comparer les coûts sociaux observés dans les trois villes qui représentent trois exemples généralisables : une petite ville portuaire (Bastia), une ville portuaire moyenne (Livourne) et une grande ville portuaire (Gênes). Cela permet d'augmenter la transférabilité de ces preuves expérientielles à d'autres villes portuaires de l'espace méditerranéen non encore évaluées.

Les trois ports qui ont fait l'objet de l'enquête sont en effet caractérisés par une taille et une vocation différentes. Avec une population de 45 000 habitants, Bastia, représentant la porte principale de la Corse, se consacre davantage à la plaisance et au transport par ferry. Livourne (environ 160 000 habitants) est le principal port de la Toscane, avec de nombreuses liaisons par ferry avec la Corse et la Sardaigne. Il possède plusieurs industries tout autour de la zone urbaine et constitue un important nœud ferroviaire de la région. Gênes est la sixième plus grande ville d'Italie et son agglomération compte environ 600 000 habitants. Le port de Gênes, avec un volume d'échanges de 58,6 millions de tonnes, se classe à ce niveau au premier rang en Italie (ISTAT, 2007) et au 15e rang en Europe (AAPA, 2014).

Il est évident que les trois villes présentent des niveaux de trafic et de pollution différents. D'un point de vue des mesures de politique publique, il est fondamental d'estimer les coûts sociaux associés à la réduction de la qualité de vie des résidents afin d'identifier la politique appropriée pour chaque cas. En d'autres termes, les politiques axées sur la réduction de la pollution, ou du moins sur son atténuation, imposent certains coûts à la collectivité. Afin d'accroître l'efficacité de la mise en œuvre de ces mesures, une analyse coûts-avantages peut aider les décideurs politiques à estimer le bénéfice net d'un projet ou d'une option. En général, les bénéfices sont plus difficiles à estimer que les coûts. Dans ce cadre, l'évaluation contingente fournit une approche directe basée sur une enquête pour obtenir l'évaluation monétaire des conditions liées à la santé d'un individu.

Ce travail examine un cas particulier de pollution portuaire : la pollution sonore. Il s'agit d'un niveau de bruit élevé ou gênant dans une zone donnée et cette nuisance est devenu un problème environnemental important pour de nombreuses autorités portuaires en Europe et en Amérique du Nord. Notre étude vise à estimer le

consentement à payer pour des améliorations de la qualité de vie des participants. Les estimations du consentement à payer sont obtenues à partir d'un échantillon représentatif de résidents locaux, ce qui représente 400 entretiens dans chaque ville incluse dans l'expérience. Les personnes interrogées sont invitées à écouter deux échantillons de bruit de 50 et 40 décibels respectivement, représentant le bruit standard des activités portuaires locales. La diminution correspondante représente la réduction potentielle du bruit générée par une nouvelle infrastructure financée par le gouvernement local. L'infrastructure proposée dans le cadre de l'expérience est l'électrification des équipements portuaires qui permettra d'éteindre les générateurs électriques des ferries et des cargos. Ensuite, un seul niveau de prix parmi les dix suivant est proposé à la personne interrogée : 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 35 ou 50 euros. Chaque participant indique s'il accepte ou non de payer la valeur qui lui est proposée. De cette façon, les répondants expriment indirectement leur CAP pour la modification du niveau de bruit mentionnée ci-dessus, cette expérience nous permettant de déterminer le CAP moyen dans les trois ports étudiés.

Ces résultats nous permettent de constater que tous les coefficients ont des signes cohérents et que la plupart d'entre eux sont statistiquement significatifs. Le coefficient associé à la variable « ENCHERE » est ainsi négatif car les valeurs les plus élevées ont moins de chances d'être acceptées. La taille du coefficient est plus importante, en termes absolus, pour Livourne, ce qui indique que des enchères plus élevées ont tendance à décourager davantage les résidents de Livourne que ceux des deux autres villes. Les variables « SENSIBILITÉ » et « SANTÉ » sont positives et significatives. Une sensibilité élevée au bruit et une conscience de la pollution sonore sont associées à un CAP plus élevé. L'exposition générale au bruit est significative et positivement corrélée au consentement à payer individuel, même si l'effet diminue à mesure que l'exposition augmente. Les femmes, en moyenne, présentent une diminution du CAP. Enfin, les personnes ayant le niveau d'éducation le plus élevé ont un CAP plus important.

Les mesures du CAP sont déduites des paramètres estimés à travers une analyse probit. Les valeurs moyennes vont de 28,11 € dans le cas de Bastia à 105,88 € pour Gênes, tandis que les valeurs médianes se situent entre 26,36 € et 99,05 € respectivement pour chacune de ces villes. En résumé, les résultats indiquent qu'il existe un CAP important pour la réduction du bruit dans les ports. En outre, les valeurs sont affectées par la localisation. Comme prévu, Gênes affiche un CAP plus élevé que Livourne et Bastia. Il est clair que cela est dû à une exposition plus importante des habitants à la pollution sonore. Cependant, même dans le cas de Bastia, l'étude montre un CAP significatif pour la réduction du bruit.

4. ÉLÉMENTS RÉCAPITULATIFS DE LA VALIDATION DU MODÈLE

La variable de réponse de l'analyse, c'est-à-dire le fait de participer ou non à une éventuelle politique publique, est une variable binaire. Les modèles à choix binaire

constituent une classe de modèles conçus pour les situations dans lesquelles la variable dépendante discrète ne peut prendre que les valeurs 1 ou 0. La particularité de cette classe de modèles réside dans l'objectif de l'estimation : alors que dans les modèles avec des variables dépendantes continues, on tente d'expliquer "combien", dans les modèles avec des variables dépendantes binaires, on tente d'expliquer "si".

Le modèle utilisé contient un certain nombre de co-variables qui sont censées influencer la volonté de payer (CAP) de l'individu. Tout d'abord, nous contrôlons pour les trois villes : BASTIA, GENOA et LIVORNO sont trois variables muettes qui prennent la valeur 1 si le répondant vient de Bastia, Gênes ou Livourne, respectivement. SENSIBILITÉ mesure la sensibilité subjective du répondant au bruit (échelle de 0 à 4). La variable HEALTH est une variable dichotomique qui vaut 1 si le répondant déclare que la pollution sonore affecte ou pourrait affecter sa santé. PORT_NOISE est une mesure subjective du bruit provenant de la zone portuaire (échelle de 0 à 4). Le BRUIT est une autre mesure subjective du bruit provenant d'autres sources (échelle de 0 à 4), comme la circulation, les trains, l'industrie, etc. FLOOR indique l'étage de l'appartement du répondant. AGE indique l'âge du répondant tandis que SEXE est une variable muette égale à 1 si le répondant est une femme. EDUCATION mesure le niveau d'éducation du répondant (échelle 0-4). Enfin, KID prend la valeur 1 si le répondant a des enfants.

Le Tabella V.1 présente les résultats de l'analyse Probit. Les colonnes (I)-(IV) présentent différentes spécifications du modèle estimé.

VARIABLES	(I)	(II)	(III)	(IV)
BASTIA	-1.141*** (0.202)			-1.343*** (0.135)
GENOA	-1.562*** (0.199)			-1.817*** (0.133)
LIVORNO	-2.042*** (0.219)			-2.253*** (0.153)
BASTIA*BID	-0.018*** (0.000)	-0.008 (0.008)		-0.018*** (0.000)
GENOA*BID	-0.007*** (0.000)	-0.007 (0.005)		-0.007*** (0.000)
LIVORNO*BID	-0.021*** (0.000)	-0.044*** (0.013)		-0.021*** (0.000)
BID			-0.0143*** (0.003)	
SENSIBILITY	0.160** (0.071)	0.143* (0.073)	0.173** (0.083)	0.147*** (0.056)

HEALTH	0.438*** (0.046)	0.265** (0.114)	0.142 (0.193)	0.465*** (0.038)
PORT_NOISE	-0.039 (0.040)	-0.090** (0.038)	-0.110*** (0.042)	
NOISE	0.467* (0.258)	0.476* (0.264)	0.487* (0.265)	0.479* (0.262)
NOISE2	-0.129* (0.067)	-0.120* (0.065)	-0.113* (0.062)	-0.139** (0.062)
FLOOR	0.012*** (0.002)	0.010 (0.007)	0.026 (0.018)	0.013** (0.005)
AGE	-0.003 (0.004)	-0.003 (0.003)	-0.001 (0.003)	
SEX	-0.171* (0.103)	-0.149* (0.083)	-0.133* (0.080)	-0.162* (0.089)
EDUCATION	0.085*** (0.015)	0.175*** (0.021)	0.210*** (0.057)	0.120*** (0.026)
KID	0.233 (0.211)	0.222 (0.204)	0.212 (0.201)	
Constant		-1.554*** (0.184)	-1.749*** (0.281)	
Count R ²	0.800	0.793	0.792	0.798
McFadden's R ²	0.125	0.099	0.072	0.117
McFadden's R ² (adjusted)	0.089	0.068	0.074	0.088
LL	-418.426	-430.826	-443.539	-422.254
AIC	870.853	889.652	911.079	872.508
Wald test	120.01***	95.21***	69.78***	112.36***
Observations	928	928	928	928

Standard error robustes entre parenthèses; *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

TABELLA V.1: DETERMINANTS DE LA FONCTION CAP

Plusieurs mesures de la qualité de l'ajustement ont été proposées pour les modèles de choix binaires ; un test largement exploité dans ce contexte est le test de Wald dans lequel tous les coefficients du modèle sont fixés à zéro, à l'exception de la constante. Toutes les spécifications montrent un test de Wald significatif. L'indice R² de McFadden mesure la distance entre le modèle estimé et un modèle comportant uniquement la constante. L'indice ajusté R² de McFadden corrige la valeur précédente en fonction du nombre de paramètres estimés. Le Count R² compare les prédictions correctes avec les

prédictions incorrectes renvoyées par le modèle. Pour les trois indicateurs, la règle est de préférer les modèles ayant des valeurs plus élevées. Enfin, le tableau **XX** montre les valeurs du critère d'information d'Akaike (AIC), qui est une méthode d'évaluation et de comparaison des modèles économétriques. Dans ce cas, la règle est de préférer les modèles ayant l'AIC le plus faible. Tous les indicateurs conduisent aux mêmes conclusions : la spécification de la colonne (I) dans le tableau **XX** donne une meilleure performance en termes de qualité du modèle. Cette spécification a donc été utilisée pour calculer le CAP dans les trois villes étudiées.

5. ÉLÉMENTS POUR L'ÉTABLISSEMENT DES LIGNES DIRECTRICES

L'estimation des coûts monétaires associés aux biens publics non marchands n'est pas une tâche aisée. Cependant, la connaissance de ces valeurs peut aider à identifier des politiques efficaces en termes de coûts, en allouant des ressources sur la base d'une évaluation rigoureuse de leurs coûts et de leurs avantages, tant dans le secteur public que dans le secteur privé. La pollution portuaire est devenue un problème important dans de nombreux pays européens et américains. Malgré l'importance de cette question, on constate une absence notable d'études dans ce domaine.

La présente étude tente en partie de combler ce manque dans la littérature. Elle examine le CAP associé à la réduction de la pollution sonore en prenant trois villes comme études de cas, à savoir Bastia, Gênes et Livourne. Au moyen d'une approche d'évaluation contingente concernant les préférences individuelles pour une réduction de la pollution sonore de 10db, l'approche identifie une volonté positive exprimée par les individus de voir mise en œuvre une intervention politique. Les résultats empiriques indiquent qu'il existe une volonté positive de payer pour électrifier la zone portuaire afin de permettre aux ferries et aux cargos d'éteindre leurs générateurs électriques. Cela permettra de réduire les émissions de bruit, en particulier pendant la nuit. Nos estimations montrent que la population de Gênes a le consentement à payer moyen le plus élevé (105,88 € x 5 ans = 529.40 euros), suivie de celle de Livourne (66,15 € x 5 ans = 330,75 euros) et de celle de Bastia (28,11 € x 5 ans = 140,55 euros).

L'amplitude des valeurs monétaires estimées démontre l'importance de l'intervention publique pour réduire la pollution sonore dans le port, en particulier l'impact économique de l'électrification des équipements portuaires a été analysé.

Index des Figures

Figure I.1: Dès premières idées proposées par les experts (à gauche), jusqu'à leur mise en œuvre logicielle (à droite).....	12
Figure I.2: Exemple de données d'entrée pour la Méthode 2-bis.....	20
Figure I.3: Exemple d'aménagement urbain dominant les nuisances sonores du port.	25
Figure II.1 - SCHÉMATISATION DU SYSTÈME ITS	42
Figure II.2-positions du relevé phonométrique sur les orthophotos	44
Figure II.3 – positions de l'enquête phonométrique ex ante de la campagne soft period (mars 2019).....	46
Figure II.4 – STATIONS DE MESURE DU BRUIT CAMPAGNE EX ANTE PÉRIODE DE POINTE (AOÛT 2019)	47
Figure II.5 – sections de l'enquête sur le flux du trafic.....	47
Figure II.6 – graphique global cumulatif des flux de trafic section 3c dir. 1 periode douce..	48
Figure II.7 – graphique global cumulé des flux de trafic section 3c dir. 1 période de pointe	49
Figure II.8 tendance de la circulation des véhicules et du bruit détecté. les périodes auxquelles se réfèrent les données considérées pour l'ensemble d'apprentissage et l'ensemble de test avec la deuxième stratégie sont mises en évidence.	51
Figure II.9 erreur pendant la phase d'essai entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées par le modèle.....	51
Figure II.10 - leqa acquis expérimentalement (vert) et prédit par ann (points rouges), en haut. différence entre les valeurs calculées et expérimentales, en bas. emplacement de la période douce 25-28mars 2019.....	52
Figure II.11 - LEQA acquis expérimentalement (vert) et prédit par ann (points rouges), en haut. différence entre les valeurs calculées et expérimentales, en bas. période de pointe du 23 au 26 août	53
Figure II.12 – localisation des sections d'enquête.....	56
Figure II.13 - comparaison été-automne des 13 sections de surveillance	57
Figure II.14 - arcs encombrés.....	59
Figure II.15 - zones de plus grande congestion.....	61
Figure II.16: points de surveillance du trafic sur le réseau routier fondamental d'olbia.....	62
Figure II.17 – points de vérification du niveau de congestion routière.....	63
Figure II.18– le PMV existant près de la port - emplacement général.....	64
Figure II.19 le PMV existant dans l'accès côtier sud du port - emplacement général.....	64
Figure II.20 – le nouveau PMV no.1 - localisation générale	65
Figure II.21 – Il le nouveau PMV no.2 - localisation générale	66
Figure II.22 – plan de localisation des infrastructures d'arpentage et d'info-mobilité	69
Figure II.23: localisation des sonomètres et des capteurs de trafic dans la zone urbaine du front de mer de la ville portuaire d'olbia pendant les campagnes expérimentales de 2019.	69
Figure II.24 exemple d'un ensemble de données synthétiques, avec des termes dynamiques, transitoires et stationnaires. chaque couleur représente une classe de véhicule et une direction de déplacement.	72

Figure II.25 détail sur le transiteur de la figure ii .25. chaque couleur représente une classe de véhicule et une direction de déplacement.	72
Figure II.26 carte des lieux de mesure. en vert les points de la première série, en bleu les points de la deuxième série de surveillance	77
Figure II.27 détail du point pb5 extrait du rapport fourni par le contractant	77
Figure II.28 détail du point ct-99 extrait du rapport fourni par le contractant	78
Figure II.29 comparaison des valeurs expérimentales et simulées de $L_{(eq,1h)}(\tau)$ au point de mesure pa1. figure 4b tendance de l'erreur de prédiction à pa1	79
Figure II.30 Comparaison des valeurs expérimentales et simulées de $L_{(eq,1h)}(\tau)$ au point de mesure PA2. Figure 5B Tendance de l'erreur de prédiction à PA2.....	80
Figure II.31 Comparaison des valeurs expérimentales et simulées de $L_{(eq,1h)}(\tau)$ au point de mesure PA3. Figure 6B Tendance de l'erreur de prédiction	80
Figure II.32 Détail du réseau routier surveillé avec indication de la position des unités de surveillance acoustique et des compteurs de trafic. En vert les points de la partie « a » du suivi, en bleu les points relatifs à la partie « b » du suivi.	91
Figure II.33: Comparaison entre les résultats du suivi au point Pa3 et les prédictions du modèle. Ci-dessus : évolution dans le temps des résultats fournis par le réseau de neurones, en gris les estimations fournies sans connaître les niveaux de bruit réels. Ci-dessous : évolution temporelle des résultats fournis par le logiciel SoundPLAN.	92
Figure III.1 – Etude photographique de la zone TDT, Port de Livorno	97
Figure III.2 – Plan schématisé de la zone TDT, Port de Livorno.....	97
Figure III.3: Exemple d'équipement de manutention et de parc à conteneurs	97
Figure III.4 – Port de livorno, sources de bruit dans la zone tdt : (a) grue de quai, (b) reach stacker, (c) transtainer, côté chemin de fer, (d) transtainer, côté cour principale, (e) conteneur réfrigéré. bruit ambiant : (f) bureaux de la tdt, (g) porte des douanes, (h) zone de pré-gate.	98
Figure III.5: Esempio di procedura di misura e post-elaborazione (Step 1)	100
Figure III.6: Esempio di procedura di misura e post-elaborazione (Step 2)	101
Figure III.7: Esempio di procedura di misura e post-elaborazione (Step 3)	101
Figure III.8: Esempio di procedura di misura e post-elaborazione (Step 4)	102
Figure III.9: Esempificazione di modellazione con software iNOISE.....	103
Figure III.10: Schematizzazione aree di lavoro macchine operatrici	104
Figure III.11: Sintesi grafica risultati SoundPlan (mappe isolivello con tutte le sorgenti accese)	105
Figure III.12: Sintesi grafica risultati SoundPlan (mappe isolivello con sorgenti elettrificabili)	105
Figure III.13: Sintesi grafica risultati SoundPlan (mappe isolivello con sorgenti non elettrificabili)	106
Figure III.14: Sintesi grafica risultati SoundPlan (mappe isolivello di confronto).....	106
Figure III.15: Sintesi grafica risultati SoundPlan (mappe isolivello di confronto).....	107

Index des Tableaux

Table II.1 localisation des stations de mesure du bruit	43
Table II.2 localisation des sections d'enquête	55
Table II.3 - caractéristiques macro des simulations	59
Table II.4 - flux détectés dans les deux sections d'accès/de sortie les plus importantes de la zone urbaine d'Olbia	61
Table II.5 - les flux simulés aux points indiqués dans la figure ii	63
Table II.6 emplacement des détecteurs de trafic.....	68
Table II.7 composition horaire du trafic de véhicules de 11h à 12h données récapitulatives avec une distribution équivalente à celle expérimentale mesurée de 11h à 12h le 26 août 2019.....	71
Table II.8 aperçu des valeurs prédites par le modèle ann pour chaque scénario.	74
Table II.9 Résumé des résultats de la validation.	94
Table III.1 Acronymes utilisés, nombre de mesures effectuées et nombre de cartes par source	100