

RAPPORT DE PROJET

"Bruit et ports

SORTIE 4.1

[Méthodologie T4.1 transfrontalière pour le la réduction et le contrôle de bruit de port"]

Composante [T4 Développement et rédaction de méthodes
 d'évaluation et de contrôle du bruit portuaire].
 bruit de port]

Organisation responsable de la composante : [UNICA-DICAAR]

| Niveau de diffusion | |
|---------------------|---------------------------------------|
| PU | Public |
| CO | Confidentiel, réservé aux partenaires |

| | |
|--|----------------------|
| Nombre de documents à livrer : | [SORTIE T4.1]. |
| Responsable de la documentation à livrer : | [Prof. Paolo Fadda]. |
| Composant : | [T4] |

| Auteur(s) - par ordre alphabétique | | |
|------------------------------------|---------------|------------------|
| Nom | Organisation | Courriel : |
| Paolo Fadda | UNIV Cagliari | fadda@unica.it |
| Federico Sollai | UNIV Cagliari | fsollai@unica.it |
| | | |
| | | |

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

| Examen des documents | | | |
|----------------------|------|---------------------|-------------|
| Version | Date | Changements | |
| | | Type de changements | Modifié par |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| Synthèse |
|----------|
| |

RÉSUMÉ

| | |
|--|----|
| Résumé | 3 |
| SECTION I. LE PROJET RUMBLE..... | 6 |
| SECTION II. LE PROJET DÉCIBEL | 8 |
| SECTION III. LE PROJET DE PORT DE LISTE | 12 |
| SECTION IV. LE RAPPORT DE PROJET | 18 |
| SECTION V. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE SIMULATION DU BRUIT PORTUAIRE 25 | |
| 1. INTRODUCTION..... | 25 |
| 2. MODÉLISATION DU BRUIT DES ACTIVITÉS PORTUAIRES | 26 |
| 3. LA MODÉLISATION DU BRUIT DES NAVIRES..... | 28 |
| 4. CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION AU BRUIT PORTUAIRE..... | 32 |
| 4.1 MÉTHODE 1 : Modélisation horaire du trafic portuaire. | 34 |
| 4.2 MÉTHODE 1a -: Évaluation de la puissance acoustique équivalente 35 | |
| 4.3 MÉTHODE 2 : Prise en compte des mouvements sur une base annuelle..... | 36 |
| 4.4 Méthode 2-bis : évaluation du niveau de puissance acoustique équivalent moyen annuel | 39 |
| 4.5 Cas particuliers..... | 40 |
| 5. SUMMARY ELEMENTS OF THE MODEL | 41 |
| 5.1 L'IDENTIFICATION DE L'IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIE..... | 41 |
| 6. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES LIGNES DIRECTRICES - | 48 |
| 6.1 Vade-mecum sur les méthodes de suivi, | 48 |
| 6.2 Type de mesures de réduction du bruit. | 49 |
| 6.3 Vademecum / méthodologies pour l'application des méthodes de prévision. | 50 |
| SECTION VI. L'ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES EN FONCTION DE LA MODIFICATION DES CONDITIONS DE CIRCULATION PAR DES MESURES DE GESTION ET DE RÉGULATION | 59 |

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION..... | 59 |
| 2. ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES FLUX DE TRAFIC ET DES ÉMISSIONS SONORES..... | 60 |
| 2.1 ANALYSE ACOUSTIQUE ENVIRONNEMENTALE | 60 |
| 2.2 ÉTUDES ACOUSTIQUES ET DE TRAFIC..... | 61 |
| 3. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU BRUIT DE LA CIRCULATION..... | 66 |
| 3.1 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL DE PRÉDICTION DU BRUIT | 66 |
| Période douce (figure VI.14) :..... | 71 |
| Période de pointe (figure VI.15) :..... | 71 |
| 3.2 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE TRAFIC À L'AIDE D'UN LOGICIEL SUMO | 71 |
| 3.3 CONSTRUIRE DES SCÉNARIOS DE TRAFIC AVEC DES SYSTÈMES D'INFO-MOBILITÉ..... | 81 |
| 3.4 APPLICATION DE LA MODÉLISATION PRÉDICTIVE PAR RÉSEAUX NEURONAUX À DES DONNÉES DE SIMULATION DE TRAFIC AVEC LE LOGICIEL SUMO | 86 |
| 4. SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION..... | 93 |
| 5. ÉLÉMENTS POUR L'ÉLABORATION DES LIGNES DIRECTRICES - IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE-..... | 98 |
| 5.1 Vade-mecum sur les méthodologies de suivi | 101 |
| 5.2 Correspondance entre les mesures du trafic et du bruit. | 104 |
| 5.3 Types de mesures de réduction | 104 |
| 5.4 Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision. | 105 |

SECTION VII. L'ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DES ACTIVITÉS PORTUAIRES DE MANUTENTION DES MARCHANDISES ET DES PERSONNES, DANS L'HYPOTHÈSE DE VECTEURS DE PROPULSION À ÉNERGIE NOUVELLE

110

| | |
|---|-----|
| 1. INTRODUCTION..... | 110 |
| 2. RÉSUMÉ DU PRODUIT T 2.3.1 | 111 |
| 2.1 Mesures acoustiques in situ | 111 |
| 2.2 Équipement utilisé et opérateurs..... | 112 |



| | | |
|--|---|-----|
| 2.3 | Matériel capturé et post-traitement | 115 |
| 2.4 | Modèles d'émissions sonores pour les nouveaux systèmes de propulsion | 118 |
| 2.5 | Estimations de la réduction du bruit des activités portuaires dans des scénarios avec différents degrés de pénétration des nouveaux équipements | 119 |
| 3. | SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION | 123 |
| 4. | ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES LIGNES DIRECTRICES..... | 124 |
| 4.1 | Vade-mecum/méthodologies pour l'application des méthodes de prévision..... | 124 |
| SECTION VIII. ÉVALUATION DES COÛTS SOCIAUX LIÉS À LA POLLUTION SONORE DANS LES PORTS (..... | | |
| | 1. INTRODUCTION..... | 126 |
| | 2. RÉSUMÉ DU PRODUIT T 2.4.1 | 126 |
| | 3. RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.4.2 | 128 |
| | 4. SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION..... | 130 |
| | 5. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES LIGNES DIRECTRICES..... | 133 |
| | Index des figures..... | 134 |
| | Index des tableaux..... | 137 |

SEZIONE I. LE PROJET RUMBLE

Le projet RUMBLE vise à contribuer à l'atténuation des émissions sonores dans les zones entourant les ports commerciaux moyens et grands dans la zone de coopération en identifiant les stratégies de base suivantes :

- accroître les connaissances et la sensibilisation de toutes les parties prenantes sur la question du bruit et des impacts des sources de bruit dans les ports, sur les questions liées à l'acceptabilité sociale du problème dans les zones urbaines voisines, sur les solutions innovantes qui peuvent être appliquées dans les zones portuaires.
- encourager la gouvernance entre les institutions publiques compétentes et la participation de la population urbaine aux choix stratégiques et aux projets proposés, afin d'accroître l'acceptabilité sociale des activités portuaires
- appliquer certaines solutions jugées appropriées pour les zones portuaires partenaires du projet, visant à atténuer les impacts des émissions sonores les plus significatives et suivre les résultats également à travers des modèles d'évaluation de l'efficacité.

Afin de poursuivre l'objectif d'accroître la durabilité dans les ports, le projet RUMBLE propose la réalisation d'études et de petites infrastructures et investissements pour l'atténuation du bruit et l'évaluation de leur efficacité, reproductibles dans toutes les réalités portuaires de la zone de coopération. Ces interventions se basent sur les résultats d'une enquête initiale sur le climat acoustique et sur les plaintes des citoyens reçues par les organismes de gestion portuaire et les institutions publiques responsables. Le projet prévoit également l'adoption d'une stratégie de suivi qui est :

- 1) liés à l'efficacité des travaux d'atténuation réalisés avec les fonds du projet dans les zones pilotes de Cagliari, Livourne et Ajaccio.
- 2) visant à évaluer l'efficacité d'un projet de grande envergure déjà réalisé sur fonds propres dans le port de Gênes.
- 3) visant à définir les meilleures interventions à mener à l'avenir dans le port de la région métropolitaine de Nice.

Dans le port de Gênes, une **dune artificielle** est prévue avec une double fonction : soustraire à la vue le terminal à conteneurs de Prà et constituer une barrière contre le bruit des activités portuaires telles que la manutention des marchandises, les grues en mouvement, etc.

Dans les autres ports du projet, l'installation de cinq bornes de recharge pour véhicules électriques dans les ports de commerce de Bastia et d'Ile Rousse (Corse, France) et la construction d'un enrobé phonique (Port de commerce d'Ile Rousse,

Corse, France ; Port de Portoferraio, Toscane, Italie ; Port de Cagliari, Sardaigne, Italie) avec la méthode CPX correspondante pour évaluer son efficacité .

Pour la construction d'une chaussée en asphalte à faible niveau sonore dans le port de Portoferraio (Toscane, Italie), l'asphalte "Low Noise" a été choisi. Dans le cadre du projet Rumble, le port de Nice a étendu son réseau de surveillance en installant 3 stations supplémentaires avec des capteurs ACOEM Class 1 Duo noise/deep L. Les résultats de l'analyse des données du port de Gênes Prà, recueillies aux trois stations de mesure dans les trois configurations différentes (avec un navire, deux ou trois sur le quai), sont les suivants : pendant la période journalière, le bruit portuaire ne semble pas être prédominant car il est couvert par des activités non portuaires, en début de matinée (h 4-7. En début de matinée (4-7h), la contribution sonore ayant le plus d'impact est celle de la faune (mouettes) et enfin, en période nocturne, lorsque des mesures propres ont été considérées, des bruits impulsifs causés par des impacts de conteneurs et diverses sirènes ont été détectés.

Dans les trois configurations considérées, l'impact sur l'emplacement proche du port et sur l'emplacement à flanc de colline varie en fonction du nombre de navires, de leur emplacement mais surtout des activités portuaires connexes. Comme les sites hébergeant les messages ont changé entre les mesures ex ante et ex post, une comparaison précise des données n'a pas été possible.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour la vitesse de référence de 50 km/h et quantifie le bénéfice acoustique des mesures d'assainissement réalisées en termes de réduction des niveaux sonores :

| | <i>Diff_{CPX}</i> [dB(A)]. | <i>Diff_{CPB}</i> [dB(A)]. |
|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Portoferraio (LI) | -3.4 0±.8 | - |
| Cagliari (CA) | -3.1 1±.3 +0.7 1±.3 -0.1 1±.3 | -5.7 3±.2 -1.0 0±.9 |
| Ile Rousse (FR-2B) | -4.5 0±.8 | -2.2 1±.3 |

Afin d'homogénéiser la vérification de l'efficacité des interventions, pour les deux méthodes CPX et CPB, un critère différentiel a été utilisé pour comparer les performances acoustiques des sols avant et après la pose. Si l'on considère les résultats de l'installation d'un plancher antibruit dans les ports de Portoferraio et d'Ile Rousse, les résultats montrent des réductions significatives des niveaux de bruit (de 2 à plus de 4 dB(A)).

En ce qui concerne les travaux de réhabilitation effectués dans le port de Cagliari, les résultats montrent une plus grande variabilité. Cependant, il faut considérer que la campagne de mesure post opératoire a été réalisée à Cagliari avant les 4 semaines

prévues à partir de la pose, donc les résultats obtenus fournissent une indication générale des performances des revêtements étudiés et doivent être confirmés par des campagnes de mesure ultérieures.

SEZIONE II. LE PROJET DÉCIBEL

L'objectif global du projet DECIBEL est d'améliorer la durabilité des ports commerciaux transfrontaliers en contribuant à la réduction/élimination de la pollution sonore. Le projet propose des mesures conjointes innovantes pour réduire les nuisances sonores dans les ports partenaires et les étendre aux ports insulaires transfrontaliers.

Les zones portuaires insulaires directement concernées par le projet sont :

- Bastia (Corse) ;
- L'Île-Rousse (Corse) ;
- Olbia (Sardaigne) ;
- Portoferraio (Toscane) ;
- Giglio (Toscane).

Les objectifs du projet sont divisés en deux phases principales :

- Étude d'impact et diagnostic transfrontalier.
- Mise en œuvre et suivi d'actions pilotes afin d'établir un catalogue de bonnes pratiques.

La méthodologie proposée se compose de deux phases :

- la phase de diagnostic, qui consiste à identifier les éléments existants contribuant à la pollution sonore et à quantifier les impacts.
- la phase de plan d'action, qui consiste à proposer une solution d'amélioration et à l'évaluer.

La phase d'analyse du fonctionnement du port et d'identification des sources a été réalisée à travers différentes inspections qui ont permis de mesurer les niveaux de puissance d'émission des sources les plus bruyantes (autres que le trafic routier). En outre, pour le calcul des indicateurs par tranche horaire et par agrégat, le positionnement des navires sur les différents quais et leurs temps relatifs ont été enregistrés.

Les données de modélisation ont été collectées à partir des différentes sources disponibles (données IGN, OpenStreetMap, données satellite SRTM, etc.). La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel MithraSIG et a également inclus la phase de paramétrage des conditions météorologiques à partir des données locales disponibles. Enfin, le choix des récepteurs de calcul a été fait sur la base des zones d'intérêt pour lesquelles il est pertinent d'évaluer les niveaux d'exposition. Pour les

cinq ports, ces zones comprennent les habitations bordant le port qui sont les plus touchées par la pollution sonore.

Les résultats des calculs présentés comprennent les indicateurs suivants pour chaque tranche horaire considérée :

- (1) Niveaux sonores associés au trafic routier uniquement, mesurés à partir d'un niveau sonore équivalent sur une heure (LAeq, 1h).
- (2) Niveaux de bruit associés aux seules sources portuaires, mesurés par un niveau de bruit équivalent sur la durée d'activation de la source (LAeq, T avec T la durée d'activation) variant selon la source considérée.
- (3) Niveaux de bruit associés au trafic routier et aux sources portuaires (mesurés par un LAeq, T comme les niveaux associés aux sources portuaires).

L'émergence des sources portuaires par rapport au trafic routier définie comme la différence entre les niveaux en (3) et les niveaux en (1) (il s'agit donc d'une émergence calculée sur la durée d'activation de la source considérée).

Ces données sont calculées pour des cartes de récepteurs couvrant toute la zone d'étude (cartographie sonore) et plusieurs récepteurs individuels de 2 m en façade de certains bâtiments afin d'analyser les résultats d'un point de vue réglementaire. La stratégie de réduction du bruit prévoit que pour chaque mesure de réduction envisagée, une méthodologie de suivi est proposée afin d'évaluer son efficacité et de vérifier que les objectifs fixés, et si nécessaire estimés par calcul dans la phase de diagnostic, ont été atteints.

Les points suivants sont fournis pour chaque source :

- Le type de sources (voir la liste ci-dessous)
- Périodes de variabilité annuelle, représentatives d'opérations suffisamment différenciées, typiquement les saisons d'activité (basse, moyenne et haute) ou la distinction entre jour de semaine et week-end.
- Le scénario d'activation quotidien, spécifiant soit le pourcentage de temps où la source est activée, soit le nombre moyen et la durée d'activation de la source, par heure de la journée, pour chaque période annuelle représentative (par exemple le nombre d'embarquements et de débarquements).
- Une brève explication de la source (qu'est-ce qui émet le bruit ? quelles sont les conditions de déclenchement possibles ?).

A titre indicatif, nous vous proposons la liste suivante de types de sources, qui peut être complétée si nécessaire :

- Navires en mer : sources de bruit actives sur les navires à l'arrivée et au départ du port (par exemple, turbines, ventilation, cheminées).
- Navires à quai : sources de bruit des navires à quai (par exemple,

générateurs, ventilation).

- Manutention horizontale ("Roll on Roll off") : déplacement d'équipements de manutention horizontale (par exemple, des machines de type Douglas).
- Manutention verticale (par exemple, grues)
- Montée et descente des véhicules sur les rampes (inclinaison des sifflets).
- Trafic routier supplémentaire induit par l'embarquement/débarquement.
- Équipement industriel (par exemple, une cimenterie).
- Autres.

Les données suivantes sont nécessaires pour la caractérisation des sources :

- Niveaux de puissance : par bande de fréquence (tiers d'octave ou octave), au moins de 100 à 5000 Hz, voire plus si la source a un contenu fréquentiel important en dehors de cette plage.
- Directivité, qui peut être supposée par défaut être omnidirectionnelle pour les sources ponctuelles et hémisphérique pour les sources proches du sol ou contiguës à un grand objet (tel qu'un navire ou un bâtiment).

Dans la plupart des cas, ces données nécessitent une campagne de mesure spécifique.

- $L_w = L_p + 10 \log(4\pi r^2)$ dans le cas d'une source sans grands obstacles à proximité (source omnidirectionnelle à champ libre).
- $L_w = L_p + 10 \log(2\pi r^2)$ dans le cas d'une source proche d'un grand objet ou du sol, qui sont tous deux considérés comme réfléchissants (source hémisphérique).

Pour l'évaluation du bruit dans l'environnement, il faut distinguer les conditions favorables à la propagation, les conditions neutres et les conditions défavorables.

Les méthodes de calcul couramment utilisées en France et en Italie (méthode française dite " NMPB " décrite dans la norme NF S31-133, ou également méthode harmonisée européenne dite " CNOSSOS-EU " décrite dans la directive européenne 2015/96 du 19/05/2015) prennent en compte ces effets en calculant un indicateur de bruit moyenné par pondération de deux conditions représentatives :

$$L_{eq,T} = 10 \lg (p_{FAV} 10^{L_{p,FAV}/10} + (1 - p_{FAV}) 10^{L_{p,HOM}/10})$$

où p_{FAV} est la fréquence d'apparition d'une condition favorable (entre 0 et 1)

Les principes de la sont décrits dans les normes. La méthode d'analyse, dont les principes sont décrits dans les normes NF S31-110 : 2005 est basée sur une grille d'évaluation qualitative, dite " grille de Zouboff ", qui utilise une caractérisation

heuristique de l'état aérodynamique et thermique de l'atmosphère. Une méthode opérationnelle est utilisée pour relier les données d'entrée de la méthode aux observations quantitatives effectuées par les stations météorologiques.

Un module logiciel dédié a été développé pour calculer les fréquences d'occurrence des conditions favorables par période horaire. Ces résultats horaires sont ensuite combinés pour produire des tableaux par période réglementaire compatibles avec la méthode de calcul (NMPB-2008 pour l'application des réglementations nationales, Cnossos-EU pour les cartes stratégiques conformes à la directive européenne).

Les niveaux de bruit sont calculés sur la zone d'étude sous la forme de cartes de bruit horizontales et à des points de réception spécifiques sur la façade de certains bâtiments.

Dans la plupart des cas étudiés, l'une des sources les plus gênantes est le bruit de l'impact des véhicules de passage sur le "sifflet" des navires pendant les opérations de chargement/déchargement. En effet, si en termes de niveau moyen calculé sur une heure, l'émergence de cette source n'est pas très importante, le caractère impulsif de ce bruit le rend très reconnaissable et potentiellement gênant.

A la suite des diagnostics acoustiques, différentes mesures sont proposées pour réduire la gêne liée au bruit des sources portuaires.

Parmi les actions possibles, les mesures suivantes ont particulièrement retenu l'attention des parties prenantes :

- Remplacement du revêtement routier par un revêtement plus silencieux sur tout ou partie des voies de circulation de la zone portuaire.
- Remplacement des véhicules commerciaux à moteur thermique utilisés dans le port par des véhicules électriques
- Installation de matériaux amortisseurs sur les plates-formes afin de limiter les bruits d'impact lors de l'entrée et de la sortie des véhicules.
- L'électrification des quais, qui permettrait aux navires de ne pas faire tourner leurs générateurs et donc d'exclure les sources dites de "ventilation" lorsque les navires sont à quai.

En outre, les ports prévoient d'installer un système de surveillance des émissions sonores des sources portuaires et de l'exposition au bruit des habitations proches du port. Ce système de suivi doit permettre de vérifier l'efficacité des mesures mises en place et de communiquer aux habitants les données relatives aux améliorations environnementales qui en résultent.

SEZIONE III. LE PROJET DE PORT DE LISTE

Le projet LIST-PORT (Limitation de la pollution sonore due au trafic dans les ports commerciaux) vise à améliorer le "climat acoustique" des villes portuaires grâce à l'utilisation de systèmes de gestion du trafic intégrés au *système de transport intelligent*.

L'objectif général de LIST-PORT est d'évaluer comment les applications STI de gestion du trafic peuvent influencer sur la réduction des pressions sonores dans l'environnement portuaire et urbain, en évaluant les effets de ces interventions sur l'environnement urbain, afin de maintenir les émissions sonores en dessous des limites autorisées par la réglementation en vigueur. Le défi du projet List-Port était d'identifier, à travers une approche commune et systémique, des interventions pour atténuer le bruit généré par le trafic généré et attiré par le nœud portuaire à travers la création d'un système de transport intelligent (ITS) intégré pour la gestion du trafic, capable de fournir automatiquement des messages d'info-mobilité capables de modifier les itinéraires des utilisateurs, en rationalisant la mobilité, par l'envoi d'informations à l'utilisateur sur la base d'élaborations réalisées avec des modèles de trafic qui, en fonction des flux de véhicules détectés instantanément, évaluent en temps réel l'état acoustique et environnemental du système et, si cela signale des limites d'impact supérieures au seuil, rationalisent et réaffectent les flux sur le réseau, par l'envoi automatique de messages d'info-mobilité qui incitent les usagers à changer d'itinéraire pour tous ceux générés/attirés par le nœud portuaire.

La plateforme ITS du projet LIST-PORT est capable de gérer, de manière automatique, intégrée et simultanée, les messages et les informations d'info-mobilité à envoyer aux utilisateurs (conducteurs). Les messages acheminés, selon le système avec lequel ils sont acheminés ou traités, sont de deux types :

- la **proximité** par le biais de panneaux à message variable (PMV) placés le long des routes vers et depuis le port ;
- **information/planification des déplacements** par le biais d'APP à installer sur les appareils mobiles qui permettent, avant d'entrer dans le réseau routier de la ville menant au nœud portuaire, de connaître l'état de congestion des routes, le niveau d'émission de bruit avec une indication des éventuelles criticités, afin de planifier consciemment le trajet et les itinéraires possibles,

Ces deux systèmes ont pour fonction d'inciter les usagers à modifier leurs itinéraires et de définir des itinéraires alternatifs pour les usagers en transit sur le réseau routier du front de mer du port, afin de réduire l'impact sonore en redistribuant le trafic de véhicules sur le réseau routier.

Avec l'action d'évaluation ex-post, par le biais d'une campagne de surveillance simultanée du bruit et du flux de trafic, l'étendue de la diminution de la pression du trafic et du bruit suite à l'introduction du système ITS LIST-PORT sera mesurée.

En testant le modèle dans les quatre villes portuaires examinées (Olbia, Bastia, Vado Ligure, Piombino), qui diffèrent en termes de conformation, de trafic, de réseau routier, d'orographie et d'aménagement urbain, il a été possible de définir un processus de généralisation qui permet la reproduction dans d'autres contextes portuaires.

Les phases préparatoires du projet LIST-PORT ont consisté en une analyse acoustique et de transport des villes portuaires pilotes identifiées dans le projet (Olbia, Bastia, Vado Ligure et Piombino). L'analyse a été réalisée en contrôlant les niveaux de trafic et de bruit sur les principales routes menant aux ports et en sortant : les réseaux routiers ont été modélisés afin de définir un modèle virtuel capable de reconstituer le scénario actuel et d'évaluer les criticités présentes, tant en termes de transport que de bruit. Le modèle vise également à simuler de nouveaux scénarios d'aménagement du réseau capables de réduire la charge des véhicules et donc l'impact sonore qu'ils génèrent. Le système expérimental intégré développé dans LIST-PORT vise à garantir l'acquisition continue de données relatives aux flux de trafic, la transmission à un centre opérationnel et la communication ultérieure d'indications spécifiques pour les usagers aux panneaux à messages variables et aux APP sur les terminaux mobiles pour la planification des itinéraires.

L'étude de caractérisation du transport a couvert les phases suivantes :

1. l'analyse des flux de mobilité actuels par l'étude de tronçons de route et d'intersections ;
2. la construction du modèle de simulation de trafic ;
3. l'identification des problèmes critiques sur la base des résultats du modèle.

Des campagnes d'enquête sur le trafic ont été menées, à des intervalles de temps déterminés, tant aux périodes douces qu'aux périodes de pointe, en hiver et en été :

Les équipements d'arpentage utilisés dans les sections et les intersections de routes sont :

1. **Équipement radar.**
2. **Caméra de surveillance des flux de circulation.**

Le modèle de trafic de la ville portuaire pilote a été développé avec le logiciel libre de simulation de trafic multimodal SUMO. Il simule et reproduit les scénarios de trafic actuels d'une zone d'étude particulière afin d'obtenir des indicateurs de transport, tels que la densité, la capacité des routes, la longueur des files d'attente, le bruit et les émissions polluantes, puis de pouvoir évaluer ces mêmes paramètres en fonction des scénarios de réorganisation et de rationalisation des routes afin d'atténuer les situations critiques et/ou encombrées de certains arcs du réseau routier examiné.

Le tableau ci-dessous résume les points critiques qui ont émergé pour chaque ville individuelle.

| VILLE | CRITIQUES |
|--------------------|---|
| Olbia | Il y a des encombrements : pendant la période estivale le matin sur 16% des arcs et l'après-midi sur 9,4% des arcs, tandis que pendant la période automnale le matin sur 8,5% des arcs et l'après-midi sur 9,9% des arcs. Sont particulièrement encombrés : la branche de la via S. Simplicio entre la via Brigata Sassari et la via Vittorio Veneto et le rond-point entre la via Roma, la via Ungheria et la via Tasso. |
| Bastia | Phénomène de congestion : pendant la période estivale le matin sur 15% des arcs et l'après-midi sur 17% des arcs, et pendant la période automnale le matin sur 16% des arcs et l'après-midi sur 22% des arcs. Sont particulièrement congestionnés : le boulevard Auguste Gaudin, le tunnel de la RT11, et le rond-point situé entre l'avenue Pierre Guidicelli, l'avenue Pascal Lota et la T11 territoriale. |
| Vado Ligure | Un point potentiellement critique pourrait être le rond-point sur Corso Svizzera à l'intersection avec Via Caravaggio. |
| Piombino | Pendant la période estivale, le réseau dans son ensemble est très fréquenté : les points critiques peuvent être le rond-point entre via Cavallotti, via Pisacane et la route communale de Portovecchio, et l'intersection 6 entre viale della Resistenza et viale Unità d'Italia. |

Le tableau récapitulatif des périodes d'enquête montre la correspondance temporelle entre les activités réalisées, à l'exception de la période douce à Olbia (mars 2019), qui, selon la tendance de la ville, peut certainement être classée en basse saison.

| | Période douce ex ante | | Période de pointe ex ante | |
|----------|-----------------------|------------|---------------------------|------------|
| | de | sur | de | sur |
| Bastia | 10/10/2019 | 19/10/2019 | 22/09/2019 | 01/09/2019 |
| Olbia | 25/03/2019 | 28/03/2019 | 23/08/2019 | 26/08/2019 |
| Piombino | 04/10/2019 | 21/10/2019 | 09/08/2019 | 20/08/2019 |

| | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| Vado Ligure | 28/10/2019 | 31/10/2019 | 29/07/2019 | 05/08/2019 |
|-------------|------------|------------|------------|------------|

TABLEAU III.1 CALENDRIER SYNOPTIQUE DES MESURES ACOUSTIQUES EFFECTUEES

En ce qui concerne la variabilité saisonnière des niveaux de pression acoustique liée à l'augmentation des activités portuaires pendant la saison estivale, on constate une tendance générale à l'aggravation des nuisances sonores, bien qu'il n'y ait pas de tendance constante et uniformément répartie, mais plutôt des effets différenciés qui peuvent être détectés au cas par cas. Dans certaines villes, la distribution temporelle des niveaux de pression acoustique équivalents dans les deux périodes est déphasée. La dynamique locale et la variabilité saisonnière des activités anthropiques ont sans doute une influence.

En ce qui concerne les méthodes d'exploitation, les enquêtes pour les villes d'Olbia, Piombino et Vado Ligure ont été réalisées presque exclusivement selon un type de *source orientée* avec le microphone placé près de l'infrastructure routière. Pour la ville de Bastia, en revanche, une approche de type *récepteur orienté* a été suivie, le microphone étant positionné près des points sensibles, généralement des bâtiments.

Les mesures effectuées en des points des villes situés à une certaine distance des ports ont une valeur de transport et de caractérisation acoustique de la source routière dans le but principalement de reconstruire le climat acoustique sur la base d'un modèle physique "statique" qui saisit la tendance des courbes de niveau de bruit dans l'espace (typiquement représentées sur des cartes bidimensionnelles) associées à certains flux horaires de trafic attribués à la section de route. Ces modèles permettent une évaluation homogène des niveaux sonores sur toute l'étendue du territoire examiné.

Grâce au système TMacs - en tant que plateforme logicielle pour la gestion du trafic et de la mobilité dans les villes portuaires, il est possible d'avoir une représentation de l'axe routier affecté par le trafic, de collecter des informations de tous les systèmes ; de traiter les données avec l'état du trafic ; de détecter les éventuelles criticités et d'élaborer des scénarios à mettre en œuvre en présence de certaines conditions.

L'architecture du système ITS a été réalisée à travers les composants suivants :

- système de caméras vidéo pour le contrôle des paramètres caractéristiques et la classification des flux de trafic, composé de 4 stations d'enquête sur les tronçons routiers considérés comme les plus pertinents ;
- No. 2 PMV graphiques et le système de gestion à distance capable de fournir des informations basées sur les conditions de circulation dans le champ détectées par le système de caméras fourni ;
- Unité de traitement pour la connexion avec les caméras et les PMV ;

- Système de communication avec équipement pour la connectivité au système central ;
- Signes et étiquettes indiquant la zone surveillée/vidéo-surveillée.

L'application LIST Port présente une conception de haut niveau (maquette) et fournit les services suivants :

- une vue cartographique du réseau routier ;
- planification et affichage sur carte des voies d'accès/sortie de la zone portuaire en fonction des conditions de circulation et de bruit et des stratégies de routage élaborées par le système d'infomobilité ITS LIST Port ;
- affichage d'informations en temps réel sur le trafic et la mobilité ;
- des informations sur les nuisances sonores, qui seront calculées sur la base des données de trafic fournies par les caméras ;
- des services de billetterie et de paiement électroniques pour la réservation et l'achat de places à bord des navires (pour les compagnies offrant un accès à leurs services de réservation/vente en ligne) ; toutefois, ces services ne seront disponibles qu'à Piombino.

La page d'accueil de l'application LIST Port permet de sélectionner le port qui vous intéresse parmi les suivants : Piombino, Vado Ligure, Olbia et Bastia tandis que le menu principal de l'application permet d'accéder à :

- **Informations sommaires en provenance** et à destination du port sur le trafic et le bruit
- **Itinéraires** (directions détaillées vers et depuis le port)
- **Caméras** (si disponibles) dans la zone portuaire (LIST PORT cameras)
- **Liens** vers les sites web des compagnies maritimes présentes dans le port sélectionné
- Achat de billets en ligne (si disponible)

L'aspect caractéristique du projet a été la coopération transfrontalière, avec laquelle il a été possible d'avoir une comparaison articulée qui tient compte de la diversité des villes portuaires européennes choisies pour l'expérimentation : leur conformation orographique, territoriale et urbaine constituait une variété suffisamment représentative des réalités portuaires méditerranéennes. L'approche transfrontalière a permis d'obtenir des données sur le comportement d'éléments d'utilisateurs de nationalités différentes, qui ont dû être prises en compte lors de la définition des paramètres des modèles de prévision et lors du calibrage des modèles. L'approche transfrontalière a permis d'obtenir des données sur le comportement des composants utilisateurs de différentes nationalités, qui ont dû être prises en compte lors de la définition des paramètres des modèles de prévision et lors de la calibration des modèles. Elle a également permis d'aborder la question par rapport à la déclinaison différente de la législation européenne dans les

différents États et régions et aux différentes lois et réglementations locales, provinciales et régionales, avec des limites et des classes de bruit qui se sont avérées beaucoup plus articulées que celles des lois nationales, permettant ainsi de poursuivre l'objectif de définir une méthodologie et une procédure de conception standardisée qui pourrait être mise à l'échelle et reproduite dans d'autres contextes portuaires urbains.

SEZIONE IV. LE PROJET DE RAPPORT

L'objectif général à long terme de REPORT est l'atténuation des émissions sonores et de l'impact sonore des ports dans la zone de coopération transfrontalière afin de rendre les infrastructures portuaires de la zone maritime plus durables grâce à la création d'une approche spécifique pour la bonne gestion du bruit portuaire qui fait actuellement défaut dans le système réglementaire, destinée à tous les acteurs qui ont l'intention d'atténuer l'impact sonore des ports.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- Création de modèles de simulation multidisciplinaires pour l'évaluation du bruit dans un environnement portuaire.
- Mise en œuvre de méthodes spécifiques pour la gestion et le contrôle du bruit portuaire : étant donné que les normes nationales et communautaires ne fournissent pas de lignes directrices adéquates pour l'évaluation du bruit des ports, l'un des objectifs de REPORT est de mettre en œuvre des méthodes spécifiques pour l'analyse du bruit portuaire qui tiennent compte des caractéristiques particulières des infrastructures portuaires.
- Diffusion des méthodes de gestion et de contrôle du bruit portuaire auprès des organismes concernés et de la communauté scientifique : une fois que l'approche correcte de la gestion du bruit portuaire a été définie, REPORT vise à transférer ces connaissances aux organismes locaux chargés de la gestion du bruit portuaire (par exemple, les autorités portuaires, les municipalités, les villes métropolitaines, les provinces), afin que la zone de l'espace maritime dispose de critères et de méthodes communs pour contrôler le bruit des ports.

Les simulations numériques, les nouveaux algorithmes et les nouvelles méthodologies visant à définir les meilleures stratégies communes de réduction du bruit développées dans le cadre du projet de rapport sont par nature générales et donc conçues pour être applicables et reproductibles dans chaque réalité portuaire. Il est donc possible de garantir le développement durable des ports commerciaux et des plates-formes logistiques connexes, en assurant leur croissance et leur expansion, tout en limitant l'impact sur la population urbaine environnante dont la sensibilité à la pollution sonore augmente.

En particulier, quatre modèles ont été développés, pour chacun desquels une activité spécifique a été définie dans le cadre du projet :

- "Développement d'un modèle de simulation du bruit : MithraSIG 5.4".
- "Analyse des émissions sonores lorsque les conditions de circulation changent grâce à des interventions de gestion et de réglementation : réseau de neurones".

- Analyse des émissions sonores des activités portuaires de manutention des marchandises et des passagers dans l'hypothèse de vecteurs de propulsion à énergie nouvelle".
- Évaluation des coûts sociaux liés à la pollution sonore dans les ports.

Les modèles développés ont été validés en modélisant les mêmes scénarios dans MithraSIG 5.4 et SoundPLAN 8.1, puis en comparant les résultats en termes de niveaux sonores avec les niveaux mesurés sur le terrain.

Afin de donner une plus grande crédibilité aux résultats obtenus à partir du réseau neuronal développé et de démontrer sa justesse et son efficacité, le projet prévoit une activité de validation spécifique à l'aide de campagnes de mesures spécifiques. Le plan de validation peut être résumé dans les phases suivantes :

- exécution d'une campagne de mesure sur un scénario sans précédent pour le réseau.
- formation du réseau sur une fraction des données de surveillance.
- génération d'estimations des niveaux de bruit par le réseau neuronal sur la base des seules données de trafic.
- simulation du scénario sur un logiciel de prévision traditionnel (SoundPLAN).
- comparaison des estimations fournies par le réseau neuronal et celles fournies par le logiciel de prévision traditionnel avec les niveaux mesurés lors de la surveillance ;
- comparaison du niveau d'incertitude du réseau avec celui fourni par les logiciels traditionnels.

L'Université de Cagliari (UNICA) a développé un réseau neuronal capable de fournir des estimations du bruit généré sur la base du trafic passant par le réseau routier. Le réseau permet d'effectuer des estimations dans des délais très courts, même d'une minute. En produisant ces estimations, le modèle offre de nets avantages en termes de puissance de calcul et de temps de traitement des données nécessaires pour prédire les niveaux attendus, par rapport aux logiciels de simulation traditionnels.

En ce qui concerne le logiciel MithraSIG5.4, malgré les différentes différences entre les deux programmes (MithraSIG5.4 et SoundPLAN8.1), une fois les unités de mesure standardisées et les différentes sources et récepteurs positionnés aux mêmes coordonnées, le delta entre les résultats aux récepteurs est inférieur à ± 1 dB(A).

| Molo Sabaudo | SoundPLAN | MithraSIG | Delta |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nom du récepteur | L _{Aeq} JOUR | L _{Aeq} JOUR | L _{Aeq} JOUR |

| | | | |
|--------------------------|------|------|-----|
| P01 - Jetée | 88.2 | 87.6 | 0.6 |
| P02 - Fabbricatino (Bar) | 88.3 | 87.4 | 0.9 |

TABLEAU IV.1 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS OBTENUES AVEC SOUNDPLAN ET MITHRASIG POUR LE SCENARIO MOLO SABAUDO.

| Quai Dente Sabauda | SoundPLAN | MithraSIG | Delta |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nom du récepteur | L _{Aeq} jour | L _{Aeq} jour | L _{Aeq} jour |
| P01 -Jetty | 93.8 | 93.8 | 0.0 |
| P02 - Sabauda ext (6ème place) | 78.8 | 78.7 | 0.1 |

TABLEAU IV.2 COMPARAISON ENTRE LES VALEURS OBTENUES AVEC SOUNDPLAN ET MITHRASIG POUR LE SCENARIO MOLO DENTE SABAUDO.

| Molo Levante Rinascita | SoundPLAN | MithraSIG | Delta |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nom du récepteur | L _{Aeq} jour | L _{Aeq} jour | L _{Aeq} jour |
| P01 - Jetée | 95.3 | 95.0 | 0.3 |
| P02 - Petite usine | 90.8 | 90.6 | 0.2 |
| P03 - Petite usine (bar) | 73.6 | 73.6 | 0.0 |

L'objectif à long terme du projet REPORT est poursuivi par une approche dédiée à la gestion du bruit portuaire. La mise en œuvre de cette approche repose d'une part sur des protocoles de mesure spécifiques et d'autre part sur des méthodes de prévision et des outils logiciels appropriés.

Les activités du projet REPORT se sont concentrées sur l'un des aspects les moins connus du bruit portuaire : les navires.

En tant que source de bruit et de nuisances sonores, ils présentent un intérêt particulier pour la modélisation des ports méditerranéens, car ces derniers sont très souvent situés à proximité de zones bâties, voire intégrés aux centres-villes.

En raison de leur taille, les bateaux ne peuvent être assimilés à une source ponctuelle fictive, comme c'est le cas pour les véhicules routiers ou les avions, et une modélisation géométrique plus détaillée est nécessaire pour tenir compte des effets de réflexion et de diffraction sur la propagation du bruit.

Cette géométrie est ensuite utilisée pour positionner des sources sonores équivalentes aux différents équipements générateurs de bruit, tels que les moteurs, les ouvertures de ventilation, les cheminées, les unités auxiliaires et autres équipements techniques.

Chaque source élémentaire doit être caractérisée expérimentalement par des mesures in situ. Compte tenu de la grande diversité des navires que l'on peut trouver dans les ports, il semble difficile de proposer des valeurs représentatives génériques 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 commun DECIBEL.

Il a été mis en évidence que le niveau sonore produit par les différentes sources peut varier dans le temps en fonction des différents modes d'exploitation, tels que l'entrée dans le port, l'accostage, le déchargement, le chargement, etc. Cette modulation dans le temps doit pouvoir être modélisée, d'une part, pour être validée et comparée aux mesures, et d'autre part, pour pondérer la contribution de chaque mode de fonctionnement au niveau sonore équivalent, moyenné sur de plus longues périodes.

Le groupe de travail a convenu que, compte tenu de la durée de chaque phase, il convenait de concentrer initialement les efforts sur la phase de chargement et de déchargement, c'est-à-dire lorsque le navire est à quai.

D'autre part, il a été souligné que les conditions météorologiques en bord de mer peuvent être sensiblement différentes de celles rencontrées sur terre. En particulier, le régime des vents varie considérablement entre le jour (vent de terre) et la nuit (vent de mer) et peut représenter des variations importantes en fonction de la saison (Libeccio ou Scirocco). Ces phénomènes influencent considérablement la propagation du bruit sur les moyennes et longues distances. Une méthode d'analyse fine des phénomènes météorologiques a été proposée et testée dans le cadre du projet DECIBEL et peut maintenant être utilisée dans le logiciel MithraSIG.

La modélisation de la propagation est indépendante de la source considérée et peut donc être réutilisée pour tout type de source de bruit. En outre, la propagation du son étant un phénomène physique bien connu, il est possible d'interchanger les méthodes de calcul sans modifier la modélisation de la source. C'est en vertu de ce principe, par exemple, que MithraSIG permet de combiner tout modèle de source avec tout modèle de propagation. D'autre part, la séparation stricte simplifie grandement la comparaison des méthodes analytiques ou heuristiques avec les calculs numériques, ce qui permet de valider plus facilement les méthodes rapides dans un grand nombre de configurations et de conditions que la validation par la seule mesure.

En réalité, les mécanismes de génération du bruit peuvent être très variés et complexes. Leur modélisation fine fait souvent appel à des méthodes numériques avancées. Leur application est donc limitée à l'objet source, quel que soit l'environnement complexe dans lequel il se trouve. Les méthodes de prédiction de l'acoustique des salles visent spécifiquement cette intégration des sources de bruit dans des environnements réels. Afin de coupler les sources de bruit avec les modèles de propagation, il est nécessaire de construire un modèle simplifié de la réalité. La modélisation consiste donc à associer à chaque source de bruit réelle un

ensemble de sources fictives (ou équivalentes) dont le rayonnement en champ lointain n'est qu'une représentation de la réalité complexe. En pratique, une source équivalente peut être un point, une ligne, une surface ou un volume. Cette modélisation consiste ensuite à déterminer, pour chaque source équivalente, son type et sa position, puis à 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 modèles numériques complexes, soit en effectuant une série de mesures. Les mesures et/ou les calculs pour caractériser les sources sont de préférence effectués à courte distance de la source, dans des conditions contrôlées, notamment dans des environnements, afin de minimiser les effets de propagation. Lorsque les modèles sont paramétrés par des données non acoustiques, celles-ci doivent être mesurées et enregistrées en parallèle avec les données acoustiques.

Le modèle ainsi construit peut ensuite être validé expérimentalement par comparaison avec les mesures initiales, puis avec de nouvelles mesures. Le cas échéant, il peut être nécessaire d'ajuster la modélisation initiale, d'ajouter ou de supprimer des sources équivalentes, de modifier leur nombre ou leur emplacement. Lorsque les résultats sont concluants, le modèle obtenu peut alors être utilisé, avec une certaine confiance, pour prédire et prévoir les niveaux sonores dans des situations et des configurations autres que celles utilisées lors du développement du modèle. En particulier, le modèle ainsi construit permettra d'évaluer les niveaux d'exposition des personnes sur leur lieu de vie, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.

Il convient de noter que l'évaluation de l'exposition au bruit peut être plus complexe que la simple détermination d'un niveau sonore car les indicateurs utilisés pour caractériser les effets du bruit sur l'homme font appel à des intégrations et/ou des pondérations dans le temps et la fréquence. Il est donc important de ne pas confondre niveau sonore instantané, niveau sonore équivalent et indicateur d'exposition au bruit.

Si la phase opérationnelle des modèles de prévision est bien documentée (souvent dans des normes ou des documents législatifs), il en va tout autrement de la phase de construction du modèle et, en particulier, de la réalisation de mesures pour l'étalonnage des sources équivalentes. Ce problème est particulièrement important pour les sources de bruit dont le niveau sonore varie considérablement dans le temps.

En résumé, la méthodologie générale de modélisation du bruit ambiant provenant d'une nouvelle catégorie de sources comprend les étapes suivantes :

1. Réaliser une analyse préliminaire de la source, identification des mécanismes de génération, importance et variabilité du bruit généré en fonction des conditions de fonctionnement.
2. Modéliser la source réelle comme un ensemble de sources équivalentes. Dans le cas des navires, ces sources sont fortement liées à leurs géométries et il est nécessaire de créer d'abord un modèle géométrique représentatif. Cette géométrie devient alors le support de positionnement des principales sources (cheminée, ventilation, machines principales et auxiliaires, équipements de manutention, etc.) qui peuvent être assimilées à des points, des lignes ou des surfaces rayonnantes. Une telle modélisation nécessite, d'une part, une bonne connaissance de la construction et de l'exploitation des navires et, d'autre part, une certaine expertise des mécanismes acoustiques de génération de bruit et de rayonnement.
3. Déterminer expérimentalement la puissance acoustique de chaque source équivalente, si nécessaire, pour les différentes phases opérationnelles du navire : arrivée et accostage, déchargement, chargement, attente, départ. Il est à noter que la puissance acoustique L_w ne peut être mesurée directement et qu'il est donc nécessaire de modéliser la relation entre celle-ci et les niveaux sonores L_p mesurés par un (ou plusieurs) microphones de référence placés en des points appropriés. Supposons donc que la relation :

$$L_p = L_w - A$$

où l'atténuation A peut être évaluée selon des normes internationales telles que les séries ISO 3741 - 3747, en utilisant des modèles analytiques qui tiennent compte de l'environnement réel du site de mesure (voir par exemple les méthodes développées dans le projet DECIBEL et reprises dans l'annexe du rapport T2.1.2 du projet REPORT), ou par simulation logicielle en utilisant le modèle numérique préalablement construit (en posant initialement $L_w = 0$ la simulation donnera l'atténuation souhaitée sous forme de $L_p = -A$).

Si nécessaire, le modèle sera ajusté pour mieux se rapprocher des 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 en les comparant avec des mesures similaires à celles utilisées pour calibrer le modèle. De préférence, cette comparaison devrait couvrir toute la période de présence du navire au port et permettre de distinguer les différentes phases et modes d'exploitation. Alors que les mesures initiales pour caractériser les puissances acoustiques

peuvent être relativement courtes (de l'ordre de quelques minutes), une telle validation nécessitera des périodes de mesure et/ou de surveillance plus longues. Pour éviter les problèmes de bruit de fond, les mesures doivent de préférence être effectuées à proximité des navires, mais suffisamment loin pour couvrir toutes les sources du navire.

5. Utiliser le modèle pour calculer des indicateurs d'exposition aux points d'intérêt (où l'objectif est de caractériser les effets du bruit sur les personnes exposées) par calcul, en tenant compte du fonctionnement réel de la source et des effets de propagation des bâtiments et des conditions météorologiques (et de leur variabilité dans le temps).
6. Valider le modèle de prédiction en le comparant aux mesures à long terme. De préférence, le lieu de mesure doit être représentatif de l'exposition des résidents, mais pas trop éloigné du port afin d'obtenir une contingence 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 prévue, comme le regroupement de plusieurs sources en une seule ou la caractérisation de plusieurs phases de fonctionnement par une seule valeur de puissance acoustique moyenne dans le temps. De telles simplifications peuvent être facilement testées et validées par simulation numérique. En principe, ces simplifications peuvent entraîner une perte de précision pour les points de mesure proches des navires ou une perte de détail dans l'évolution temporelle des niveaux sonores, tandis que l'impact sur les indicateurs d'exposition (tels que L_{den} ou L_n) 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 100 m de long peut être considéré comme une source ponctuelle unique pour des récepteurs situés à au moins 200 ou 300 m...

Les principes de la modélisation des navires ont été testés par le CSTB dans le cadre du projet DECIBEL. La modélisation manuelle du navire s'est avérée pertinente en termes de résultats acoustiques et réalisable avec les outils disponibles. Cependant, la modélisation manuelle semble peu pratique et prend beaucoup de temps. L'objectif fixé pour l'activité T2.1.2 du projet REPORT était d'automatiser cette modélisation et de simplifier l'activité au point de la rendre accessible à tous les utilisateurs.

SEZIONE V. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE SIMULATION DU BRUIT PORTUAIRE

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 de réduire les émissions sonores des ports dans la zone de coopération transfrontalière, afin de rendre les installations portuaires de la zone maritime plus durables. Pour ce faire, il faut développer une approche spécifique de la gestion du bruit dans les ports. La mise en œuvre de cette approche repose d'une part sur des protocoles de mesure spécifiques et d'autre part sur des méthodes de prévision et des outils logiciels appropriés.

1. INTRODUCTION

En guise d'introduction, il convient toutefois de noter que le bruit portuaire n'existe pas ou, du moins, ne constitue pas un problème en soi. Tout au plus pouvait-on parler du bruit des vagues se brisant sur les rives ou du bruit du vent dans le gréement. Et qui aurait l'idée de classer ces sons comme source de nuisance sonore (considérant que "le bruit est un son non désiré"). Cependant, les ports sont le théâtre d'un grand nombre d'activités directement ou indirectement liées au transport maritime. Ainsi, le véritable objet du travail des ingénieurs acousticiens est de caractériser, contrôler et réduire les nuisances sonores produites par les activités portuaires pour les populations vivant à proximité des ports. La protection des travailleurs portuaires contre le bruit excessif à leur poste de travail est une autre question qui mérite l'attention mais qui dépasse le cadre de ce projet.

Les activités portuaires qui peuvent être une source de nuisance sonore pour les résidents sont nombreuses et variées. La principale fonction d'un port est de faciliter le changement des moyens de transport des personnes et des marchandises. En particulier, le transbordement de marchandises, qu'il s'agisse de conteneurs ou de marchandises en vrac, nécessite des manipulations et des installations qui produisent un bruit audible dans les zones familières proches des ports. Pour les ports de l'île, le trafic des ferries est une activité essentielle dans la vie économique et touristique de l'île. Souvent, les quais de ferry sont situés très près des centres-villes, et c'est l'entrée et la sortie des véhicules qui causent le plus de désagréments aux résidents proches ou aux personnes qui se promènent le long des quais.

De par sa fonction première, un port génère donc un trafic important, qu'il soit maritime, routier ou ferroviaire, lié à l'arrivée et au départ des personnes et des marchandises. Par conséquent, l'activité portuaire est susceptible de générer des nuisances sonores bien au-delà de son contrôle. L'importance d'un port se mesure

à l'importance de l'arrière-pays qu'il dessert. La zone portuaire est le lieu où convergent les trafics routiers et ferroviaires en provenance ou à destination de l'arrière-pays et cette concentration entraîne une augmentation des nuisances sonores. 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, provoque une saturation des voies étroites avec des effets négatifs sur la qualité des transports. l'environnement atmosphérique et sonore.

Le transbordement de marchandises s'accompagne souvent d'un traitement sur place des matières premières arrivant par la mer avant leur distribution à l'intérieur du pays. La plupart des grands ports commerciaux intègrent donc de grandes installations industrielles, notamment pétrochimiques, qui fonctionnent 7 jours sur 7, 24 heures sur 24. Ces installations industrielles génèrent un bruit qui se propage sans entrave aux zones résidentielles voisines.

La plupart de ces aspects ont été décrits et étudiés dans de nombreux projets nationaux et européens, tels que les projets NMPB et HARMONOISE pour le bruit routier et ferroviaire, IMAGINE pour le bruit industriel et NoMEPorts pour les (très) grands ports. Pour cette raison, et compte tenu des contraintes de temps et de budget, les efforts du projet REPORT se sont concentrés sur l'un des aspects les moins connus du bruit portuaire, à savoir les navires eux-mêmes.

Les navires en tant que source de bruit et de nuisances sonores présentent un intérêt particulier pour la modélisation des ports méditerranéens, car ces derniers sont très souvent situés à proximité de zones bâties, voire intégrés aux centres-villes.

2. MODÉLISATION DU BRUIT DES ACTIVITÉS PORTUAIRES

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

L'objectif de la sous-tâche T2.1.1 était d'identifier les adaptations nécessaires à une prise en compte adéquate des spécificités des zones portuaires dans le cadre d'une analyse du bruit à l'échelle urbaine, que ce soit dans la définition d'une carte d'exposition des populations au voisinage des zones portuaires, d'une étude d'impact lors d'une modification ou d'un nouveau projet, ou encore d'une évaluation de l'effet d'une limitation du bruit. Ces modifications sont destinées à être mises en œuvre dans un outil existant, le logiciel MithraSIG v5, développé

conjointement par le CSTB et la société Geomod, dédié aux études d'impact du bruit extérieur et aux cartes stratégiques de bruit.

Le travail conjoint du CSTB et de l'UNIGE a permis, d'une part, de mettre en évidence les fonctionnalités existantes dans le logiciel MithraSIG applicables au cas du bruit portuaire, comme 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 pour modéliser plus précisément les différentes activités portuaires.

Cette analyse a permis de conclure que l'effort devait principalement porter sur la modélisation géométrique et acoustique des navires. En raison de leur taille, les navires ne peuvent être assimilés à une source ponctuelle fictive, comme c'est le cas pour les véhicules routiers ou les avions, et une modélisation géométrique plus détaillée est nécessaire pour tenir compte des effets de réflexion et de diffraction sur la propagation du bruit.

Cette géométrie est ensuite utilisée pour positionner des sources sonores équivalentes aux différents équipements générateurs de bruit, tels que les moteurs, les ouvertures de ventilation, les cheminées, les unités auxiliaires et autres équipements techniques.

Chaque source élémentaire doit être caractérisée expérimentalement par des mesures in situ. Compte tenu de la grande diversité des navires que l'on peut trouver dans les ports, il semble difficile de proposer des valeurs représentatives génériques 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 commun DECIBEL.

Il a été mis en évidence que le niveau sonore produit par les différentes sources peut varier dans le temps en fonction des différents modes d'exploitation, tels que l'entrée dans le port, l'accostage, le déchargement, le chargement, etc. Cette modulation dans le temps doit pouvoir être modélisée, d'une part, pour être validée et comparée aux mesures, et d'autre part, pour pondérer la contribution de chaque mode de fonctionnement au niveau sonore équivalent, moyenné sur de plus longues périodes.

Le groupe de travail a convenu qu'étant donné la durée de chaque phase, il convenait de concentrer initialement les efforts sur la phase de chargement et de déchargement, c'est-à-dire lorsque le navire est à quai.

D'autre part, il a été souligné que les conditions météorologiques en bord de mer peuvent être sensiblement différentes de celles rencontrées sur terre. En particulier, le régime des vents varie considérablement entre le jour (vent de terre) et la nuit (vent de mer) et peut représenter des variations importantes en fonction de la saison (Libeccio ou Scirocco). Ces phénomènes influencent considérablement la

propagation du bruit sur les moyennes et longues distances. Une méthode d'analyse fine des phénomènes météorologiques a été proposée et testée dans le cadre du projet DECIBEL et peut maintenant être utilisée dans le logiciel MithraSIG.

3. EN MODÉLISANT LE BRUIT DES BATEAUX.

Toutes les méthodes de prédiction développées ces dernières années sont basées sur le principe physique d'une séparation stricte entre la description des sources et la modélisation des phénomènes de propagation. Cela contraste avec les anciennes approches qui prévoyaient souvent des algorithmes spécifiques pour chaque type de source. Dans ces méthodes, la source était souvent caractérisée par une quantité particulière difficile à comprendre, telle que 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 donc être réutilisée pour tout type de source de bruit. En outre, la propagation du son étant un phénomène physique bien connu, il est possible de changer de méthode de calcul sans modifier la modélisation de la source. C'est dans cet esprit, par exemple, que MithraSIG permet de combiner tout modèle de source avec tout modèle de propagation. D'autre part, la séparation stricte simplifie grandement la comparaison des méthodes analytiques ou heuristiques avec les calculs numériques, ce qui permet de valider plus facilement les méthodes rapides dans un grand nombre de configurations et de conditions que la validation par la seule mesure.

En réalité, les mécanismes de génération du bruit peuvent être très variés et complexes. Leur modélisation fine fait souvent appel à des méthodes numériques avancées. Leur application est donc limitée à l'objet source, quel que soit l'environnement complexe dans lequel il se trouve. Les méthodes de prédiction de l'acoustique des salles visent spécifiquement cette intégration des sources de bruit dans des environnements réels. Afin de coupler les sources de bruit avec les modèles de propagation, il est nécessaire de construire un modèle simplifié de la réalité. La modélisation consiste donc à associer à chaque source de bruit réelle un ensemble de sources fictives (ou équivalentes) dont le rayonnement en champ lointain n'est qu'une représentation de la réalité complexe. En pratique, une source équivalente peut être un point, une ligne, une surface ou un volume. Cette modélisation consiste ensuite à déterminer, pour chaque source équivalente, son type et sa position, puis à 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

modèles numériques complexes, soit en effectuant une série de mesures. Les mesures et/ou les calculs pour caractériser les sources sont de préférence effectués à courte distance de la source, dans des conditions contrôlées, notamment dans des environnements, afin de minimiser les effets de propagation. Lorsque les modèles sont paramétrés par des données non acoustiques, celles-ci doivent être mesurées et enregistrées en parallèle avec les données acoustiques.

Le modèle ainsi construit peut ensuite être validé expérimentalement par comparaison avec les mesures initiales, puis avec de nouvelles mesures. Le cas échéant, il peut être nécessaire d'ajuster la modélisation initiale, d'ajouter ou de supprimer des sources équivalentes, de modifier leur nombre ou leur emplacement. Lorsque les résultats sont concluants, le modèle obtenu peut alors être utilisé, avec une certaine confiance, pour prédire et prévoir les niveaux sonores dans des situations et des configurations autres que celles utilisées lors du développement du modèle. En particulier, le modèle ainsi construit permettra d'évaluer les niveaux d'exposition des personnes sur leur lieu de vie, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.

Il convient de noter que l'évaluation de l'exposition au bruit peut être plus complexe que la simple détermination d'un niveau sonore car les indicateurs utilisés pour caractériser les effets du bruit sur l'homme font appel à des intégrations et/ou des pondérations dans le temps et la fréquence. Il est donc important de ne pas confondre niveau sonore instantané, niveau sonore équivalent et indicateur d'exposition au bruit.

Si la phase opérationnelle des modèles prédictifs est bien documentée (souvent dans des normes ou des documents législatifs), il en va tout autrement de la phase de construction du modèle et, en particulier, de la réalisation de mesures pour l'étalonnage des sources équivalentes. Ce problème est particulièrement important pour les sources de bruit dont le niveau sonore varie considérablement dans le temps.

En résumé, la méthodologie générale de modélisation du bruit ambiant provenant d'une nouvelle catégorie de sources comprend les étapes suivantes :

8. Réaliser une analyse préliminaire de la source, identification des mécanismes de génération, importance et variabilité du bruit généré en fonction des conditions de fonctionnement.
9. Modéliser la source réelle comme un ensemble de sources équivalentes. Dans le cas des navires, ces sources sont fortement liées à leurs géométries et il est nécessaire de créer d'abord un modèle géométrique représentatif. Cette géométrie devient alors le support de positionnement des principales sources (cheminée, ventilation, machines principales et auxiliaires, équipements de manutention, etc.) qui peuvent être assimilées à des points,

des lignes ou des surfaces rayonnantes. Une telle modélisation nécessite, d'une part, une bonne connaissance de la construction et de l'exploitation des navires et, d'autre part, une certaine expertise des mécanismes acoustiques de génération de bruit et de rayonnement.

10. Déterminer expérimentalement la puissance acoustique de chaque source équivalente, si nécessaire, pour les différentes phases opérationnelles du navire : arrivée et accostage, déchargement, chargement, attente, départ.

Il est à noter que la puissance acoustique L_w ne peut être mesurée directement et qu'il est donc nécessaire de modéliser la relation entre celle-ci et les niveaux sonores L_p mesurés par un (ou plusieurs) microphones de référence placés en des points appropriés. Supposons donc que la relation :

$$L_p = L_w - A$$

où l'atténuation A peut être évaluée selon des normes internationales telles que les séries ISO 3741 - 3747, en utilisant des modèles analytiques qui tiennent compte de l'environnement réel du site de mesure (voir par exemple les méthodes développées dans le projet DECIBEL et reprises dans l'annexe du rapport T2.1.2 du projet REPORT), ou par simulation logicielle en utilisant le modèle numérique préalablement construit (en posant initialement $L_w = 0$ la simulation donnera l'atténuation souhaitée sous forme de $L_p = -A$).

Si nécessaire, le modèle sera ajusté pour mieux se rapprocher des mesures, par exemple en ajoutant et/ou en déplaçant des sources créées lors de la construction du modèle initial.

11. Valider la modélisation des sources en les comparant avec des mesures similaires à celles utilisées pour calibrer le modèle. De préférence, cette comparaison devrait couvrir toute la période de présence du navire au port et permettre de distinguer les différentes phases et modes d'exploitation. Alors que les mesures initiales pour caractériser les puissances acoustiques peuvent être relativement courtes (de l'ordre de quelques minutes), une telle validation nécessitera des périodes de mesure et/ou de surveillance plus longues. Pour éviter les problèmes de bruit de fond, les mesures doivent de préférence être effectuées à proximité des navires, mais suffisamment loin pour couvrir toutes les sources du navire.
12. Utiliser le modèle pour calculer des indicateurs d'exposition aux points d'intérêt (où l'objectif est de caractériser les effets du bruit sur les personnes exposées) par calcul, en tenant compte du fonctionnement réel de la source

et des effets de propagation des bâtiments et des conditions météorologiques (et de leur variabilité dans le temps).

13. Valider le modèle de prédiction en le comparant aux mesures à long terme. De préférence, le lieu de mesure doit être représentatif de l'exposition des résidents, mais pas trop éloigné du port afin d'obtenir une contingence suffisante par rapport au bruit résiduel (et notamment le bruit du trafic routier non lié aux activités portuaires).
14. Proposer et tester des simplifications du modèle initial en fonction de l'application prévue, comme le regroupement de plusieurs sources en une seule ou la caractérisation de plusieurs phases de fonctionnement par une seule valeur de puissance acoustique moyenne dans le temps. De telles simplifications peuvent être facilement testées et validées par simulation numérique. En principe, ces simplifications peuvent entraîner une perte de précision pour les points de mesure proches des navires ou une perte de détail dans l'évolution temporelle des niveaux sonores, tandis que l'impact sur les indicateurs d'exposition (tels que L_{den} ou L_n) 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 100 m de long peut être considéré comme une source ponctuelle unique pour des récepteurs situés à au moins 200 ou 300 m...

Les principes de la modélisation des navires ont été testés par le CSTB dans le cadre du projet DECIBEL. La modélisation manuelle du navire s'est avérée pertinente en termes de résultats acoustiques et réalisable avec les outils disponibles. Cependant, la modélisation manuelle semble peu pratique et prend beaucoup de temps. L'objectif fixé pour l'activité T2.1.2 du projet REPORT était d'automatiser cette modélisation et de simplifier l'activité au point de la rendre accessible à tous les utilisateurs. À notre connaissance, cette fonctionnalité n'est disponible dans aucun autre logiciel de modélisation acoustique et/ou outil de production de 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 à la fin de l'année 2020. Toutefois, il est prévu que le logiciel continue à évoluer, notamment en tenant compte des observations résultant de la tâche T3 1 qui vise à valider les approches méthodologiques produites et leur mise en œuvre sous forme de logiciel.

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

- Une courte présentation de la fonctionnalité du logiciel MithraSIG, y compris les principes de modélisation et de calcul acoustiques.
- Les aspects méthodologiques de la modélisation acoustique des principales sources de bruit liées aux activités portuaires.
- Mise à jour du manuel d'utilisation du logiciel MithraSIG, détaillant le fonctionnement du nouveau module de port.

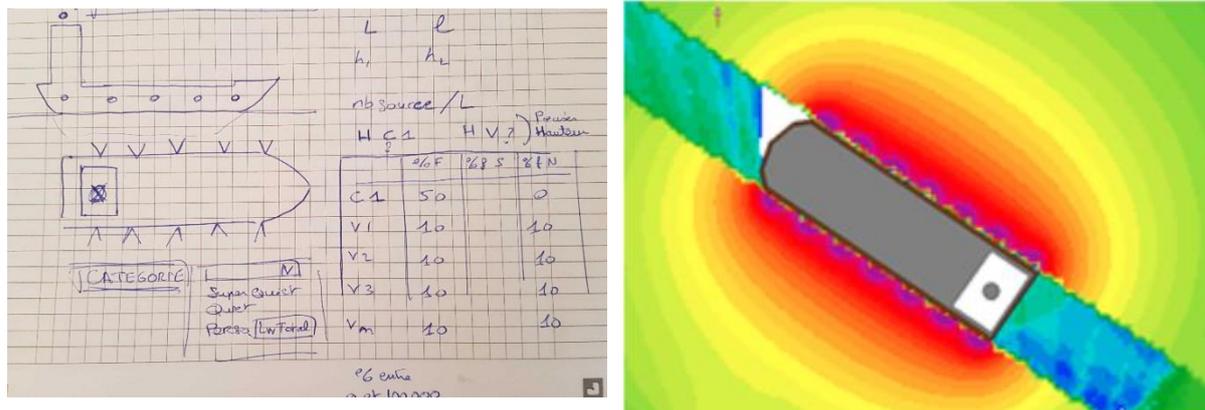


FIGURE V.1 DES PREMIERES IDEES PROPOSEES PAR LES EXPERTS (A GAUCHE) A LEUR MISE EN ŒUVRE DANS LE LOGICIEL (A DROITE).

4. LA CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION AU BRUIT PORTUAIRE.

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

Ce type de modélisation est bien adapté à l'évaluation de la nuisance sonore associée à une configuration particulière, par exemple lors de l'examen de plaintes occasionnelles ou récurrentes de résidents. Il permet également d'étudier les meilleurs moyens de réduire le bruit à la source des plaintes. Lors du calcul de cette configuration, on peut supposer que sa géométrie reste invariable dans le temps, car nous sommes principalement intéressés par le bruit produit pendant la période où un navire particulier est amarré et les différentes phases de déchargement et de chargement sont modélisées en détail. La prise en compte des heures d'arrivée et de départ des ferries permet une évaluation plus détaillée des nuisances sonores causées en fonction du moment de la journée. Ainsi, un débarquement qui commence avant 7 heures du matin ou un embarquement qui se termine après 19 heures sera plus perturbant que lorsque la même activité a lieu en milieu de journée.

Toutefois, afin d'évaluer les effets du bruit sur la santé, la directive européenne recommande l'utilisation des indicateurs Lden ("niveau de jour presque soir") et Ln ("niveau de nuit"), évalués en tant que valeurs moyennes sur un an. représentatif.

Il convient de noter que les activités portuaires sont, à cet égard, très différentes des autres sources de bruit couvertes par la directive. Les trafics routier, ferroviaire et aérien, ainsi que la plupart des installations industrielles, sont caractérisés par un bruit plus ou moins stable dans le temps à l'échelle des périodes " jour ", " soir " et " nuit ", même si des variations de niveaux sonores de l'ordre de 3 à 6 dB peuvent se produire en raison de la modulation du trafic en fonction des heures de la journée, du jour de la semaine ou encore des aléas climatiques. De plus, l'emplacement de ces sources sonores varie peu ou pas du tout dans le temps. L'approche méthodologique compatible avec les exigences de la directive consiste donc à considérer une journée représentative de 24 heures et à utiliser les valeurs moyennes quotidiennes du débit et de la vitesse comme données d'entrée. De même, la propagation du son est modélisée en prenant les conditions météorologiques comme une moyenne annuelle ou, au mieux, une moyenne saisonnière. Les niveaux sonores horaires sont ensuite combinés avec des pondérations appropriées pour obtenir une valeur Lden représentative de l'année entière. De même, l'évaluation expérimentale d'indicateurs à long terme pour les sources de bruit couvertes par la directive européenne sera en principe basée sur des mesures ponctuelles sur quelques heures ou quelques jours, avec éventuellement des corrections en fonction du trafic observé lors des mesures.

Dans les ports, la situation est tout à fait différente. Les navires arrivent plus ou moins régulièrement, quotidiennement (ferries), mensuellement, annuellement, etc., et restent à quai le temps de transborder passagers et marchandises (de quelques heures pour les ferries à plusieurs jours pour les navires marchands) avant de repartir pour des traversées plus ou moins longues.

Il convient de rechercher une approche pragmatique qui tienne compte du fonctionnement réel des ports et de la variabilité temporelle des niveaux d'exposition lors du calcul de leur moyenne annuelle.

Pour ce faire, il est nécessaire de distinguer deux modes d'exploitation spécifiques : d'une part, l'exploitation liée au trafic quotidien régulier comme les ferries (avec un ou plusieurs passages quotidiens et une présence à quai de l'ordre de quelques heures) ; d'autre part, l'exploitation des grands ports commerciaux accueillant des navires long-courriers (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 exige un certain effort de modélisation de la part de l'utilisateur (informé). L'assistance à la saisie des données

et/ou l'automatisation de la saisie des données peuvent être considérées, après une certaine période d'expérimentation et de retour d'information des premiers utilisateurs, comme nécessaires pour valider la méthodologie proposée. En ce sens, la fonctionnalité du port dans MithraSIG peut continuer à évoluer après la fin du projet REPORT.

4.1 MÉTHODE 1 : modélisation horaire du trafic portuaire.

Considérons ici le cas des ports insulaires dont le trafic principal est constitué de ferries qui effectuent des traversées une ou deux fois par jour selon des horaires fixes. Ses ferries sont souvent amarrés à proximité de la ville et leur géométrie influence grandement la propagation du son. En principe, l'affectation des navires aux postes d'amarrage est invariable.

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

Exemple :

| Calcul | Configuration |
|--------|---|
| 1 | Trafic terrestre résiduel, pas de navires au port |
| 2 | Bateau A au quai 1 + trafic routier induit par les voitures entrantes/sortantes |
| 3 | Bateau B au quai 2 + trafic routier induit par les voitures entrantes/sortantes |
| 4 | Bateau C au quai 3 + trafic routier induit par les voitures entrantes/sortantes |

TABLEAU V.1 EXEMPLE DE CONFIGURATION DE LA CUVE POUR LA METHODE 1

Afin d'évaluer les niveaux d'exposition moyennés sur une journée (et par extension sur une année), il faut tenir compte des heures de présence au quai. En mode "saisie de l'heure", il suffit d'indiquer la présence/absence du navire sur le quai indiqué. Lorsque le navire est absent, la puissance équivalente des sources est mise à zéro, sinon la puissance nominale des sources en fonctionnement est utilisée 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 V.2 METHODE 2 - CONFIGURATION DE LA SOURCE - MODE DE SAISIE DU TEMPS

A partir de ces données, nous pouvons calculer le niveau $L_{A,eq,T}$ par période horaire et, à partir de là, les indicateurs européens, Lden et Ln, en tenant compte des pénalités pour les périodes de soirée ou de nuit.

à noter :

- Il est possible d'inclure dans chaque calcul le trafic de véhicules généré par le passage d'un navire et donc d'évaluer plus spécifiquement l'urgence sonore correspondante, en assimilant le trafic résiduel au bruit de fond hors activités portuaires.
- Pour plus de précision, vous pouvez saisir une prévision météorologique spécifique par heure. La saisie peut être automatisée si les données météorologiques sont disponibles au format METAR (voir la procédure prévue à cet effet dans le projet DECIBEL).

Pour le calcul des indicateurs Leq ou Lden en tant que valeurs moyennes annuelles, nous supposons que chaque calcul correspond à un "jour représentatif" de 24 heures. Nous obtenons ensuite le résultat souhaité en additionnant les résultats partiels associés à chaque calcul :

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

où la somme fait référence à toutes les configurations calculées.

L'utilisation d'une somme pondérée peut être utile si l'on veut tenir compte du fait que le trafic maritime est soumis à des fluctuations saisonnières et qu'une liaison donnée ne fonctionne qu'une partie de l'année. Par exemple : si la ligne C ne fonctionne que pendant la période estivale, c'est-à-dire 180 jours par an, la formule devient :

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

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 en fonction de la saison, il peut être nécessaire de combiner cette méthode avec la méthode 1a présentée ci-dessous.

4.2 MÉTHODE 1a - : Évaluation de la puissance acoustique équivalente

On peut aussi préférer une "saisie par période", auquel cas il faudra saisir le nombre d'heures de présence, ou la fraction de temps de présence, au 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 | | | | | | | |

TABLEAU V.3 METHODE 1 BIS -- CONFIGURATION DE LA SOURCE - MODE D'ENTREE PERIODIQUE -

Dans ce cas, la puissance acoustique équivalente par période de calcul est évaluée en tenant compte de la fraction du temps de fonctionnement effectif des sources selon 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 facile à mettre en œuvre que la première, présente un inconvénient : les résultats sont exprimés directement en moyenne sur la période et ne donnent pas accès aux niveaux sonores réels qui pourraient être mesurés lorsque le navire est présent. Par exemple : lorsqu'un bateau particulier est présent au port, il y a un niveau sonore L_p (ou $L_{p,eq,1h}$) de 52 dB (A) à l'avant des bâtiments les plus proches. Si ce bruit persiste pendant 1 heure sur 8, on obtiendrait un résultat moyen (sur une période de 8 heures) de 43 dB (A) et on pourrait en conclure à tort que le bruit de ce navire ne pose pas de problème.

4.3 MÉTHODE 2 : prise en compte des mouvements sur une base annuelle.

Considérons maintenant le cas typique des navires marchands (grands ou petits) qui desservent le port plusieurs fois par an (une fois par semaine, une fois par mois...) et restent à quai pendant plusieurs jours pour décharger et charger des marchandises avant de repartir pour une nouvelle traversée. En principe, la configuration du port est en constante évolution, les navires entrant et sortant à des rythmes variables. Certains assurent des liaisons régulières, d'autres visitent le port en fonction de leur empressement.

En théorie, nous pourrions faire une simulation complète pour chaque jour de l'année, en tenant compte de la présence ou de l'absence de chaque navire sur un poste d'amarrage particulier, puis calculer la moyenne annuelle à partir de cette série chronologique, mais cela est totalement irréaliste, compte tenu de la quantité de données à saisir et du 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 d'entre eux (comme dans le cas de la méthode 1 présentée ci-dessus).

Une solution pragmatique consiste donc à échantillonner l'année à partir d'un nombre limité de configurations typiques et représentatives. Dans chaque

configuration, plusieurs navires peuvent être amarrés à différents endroits en même temps.

Par exemple :

| Calcul | Configuration |
|--------|--|
| 1 | Navire A - jetée 101, navire B - jetée 203, navire C - jetée 651 |
| 2 | Navire A - quai 103, navire D - quai 211, navire E - quai 502 |
| 3 | Navire X - jetée 101, Navire Y - jetée 206, Navire Z - jetée 777 |
| 4 | etc. |

TABLEAU V.4 EXEMPLE DE CONFIGURATION DE LA CUVE POUR LA METHODE 2

Pour le calcul, on suppose que, dans chaque configuration, les navires modélisés sont présents au quai 24 heures sur 24. Le bruit produit par chaque bateau peut éventuellement être modulé soit par les heures de fonctionnement (voir méthode 1 ci-dessus), soit par une fraction de la durée des périodes (voir méthode 1-Bis ci-dessus).

| Mode : saisie horaire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|----|---|---|---|---|---|---|------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|
| Période | NUIT | | | | | | | | JOUR | | | | | | | | | | | SOIREE | | | | |
| | 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 | 0 |

TABLEAU V.5 METHODE 2 - CONFIGURATION DE LA SOURCE - SAISIE DES TEMPS

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

TABLEAU V.6 METHODE 2 - CONFIGURATION DE LA SOURCE - PERIODE D'ENTREE

Lorsqu'une source est éteinte pendant une certaine période, nous réinitialisons sa puissance acoustique équivalente à l'entrée du calcul, sinon nous lui attribuons sa puissance nominale. Si l'entrée est en nombre d'heures de fonctionnement par période, la puissance acoustique équivalente est modulée sur la période, en tenant compte du 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.

Note : Dans la méthode 1, l'indicateur de temps représentait la présence ou l'absence du navire à un endroit particulier. Dans les tableaux ci-dessus, la géométrie du navire et de ses sources reste invariable et l'indicateur n'est utilisé que pour décrire le fonctionnement ou la fermeture des sources.

Vous trouverez ci-dessous quelques conseils pour choisir les navires modélisés dans chaque configuration :

- Lorsque la présence et l'absence de deux navires sont positivement corrélées (les deux sont systématiquement présents en même temps), il est conseillé de modéliser leur passage dans la même configuration, ainsi le calcul tiendra compte de la présence de l'un sur la propagation du second. Ce cas est assez exceptionnel mais il peut se produire (par exemple, dans le cas d'un transbordement d'un navire de haute mer vers des barges distribuant des marchandises à l'intérieur des terres).
- Lorsque la présence de deux navires n'est pas corrélée, on peut tout de même les modéliser dans une configuration unique tant que la distance entre les deux est suffisante pour que la présence de l'un ne modifie pas significativement la propagation du bruit causé par l'autre. Plusieurs navires seront donc placés dans une même configuration afin de minimiser les interactions acoustiques (réflexions, diffractions) entre deux navires voisins. En d'autres termes, nous allons essayer de répartir tous les navires dans les différentes configurations, en veillant à maximiser la distance entre les navires d'une même configuration.

Le calcul de l'indicateur global (moyenne annuelle) est ensuite effectué en 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 se réfère à toutes les N configurations calculées.

Attention : il s'agit ici de calculer une moyenne alors que dans la méthode 1, il suffit d'additionner les différentes contributions.

Lorsque certaines configurations sont plus probables que d'autres, il est possible de calculer une moyenne pondérée en tenant compte du nombre de jours où une configuration donnée se produit au cours d'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 .

Remarque : la somme du nombre de jours pour chaque configuration ne doit pas nécessairement être de 365 jours... Avantage de la méthode : nous pouvons évaluer rapidement l'impact d'un changement dans les opérations portuaires, d'une augmentation et/ou d'une diminution du trafic. Exemple : pour 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.

Note : Si à la fin du calcul, les résultats sont stockés par groupe de sources et à condition que chaque groupe soit associé à un navire particulier, on peut moduler

plus finement la présence de chaque navire en fonction du 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 combinée), $L_{DEN,i}$ le résultat partiel pour le groupe de sources associé à un navire, et N_i le nombre de jours où le navire était au port. i .

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

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

Comme ci-dessus, il peut être nécessaire de créer différentes configurations pour minimiser les interactions acoustiques (réflexions, diffraction) entre deux navires voisins.

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

| Calcul | Configuration (navire/quai) | Nombre de jours/année |
|--------|-----------------------------|-----------------------|
| 1 | Navire A - Quai 101 | 42 |
| | Navire B - Quai 203 | 33 |
| | Navire C - Quai 651 | 25 |
| 2 | Navire A - quai 103, | 12 |
| | Navire D - quai 211, | 40 |
| | Navire E - quai 502 | 52 |
| 3 | Navire X - Quai 101 | 15 |
| | Navire Y - Quai 206, | 17 |
| | Navire Z - quai 777 | 23 |
| 4 | etc. | |

TABLEAU V.7 EXEMPLE DE CONFIGURATION DE LA CUVE POUR LA METHODE 2-BIS

Dans ce cas, la puissance sonore "équivalente" de chaque source doit être corrigée pour les heures de fonctionnement et les 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 où le navire est au port.

Le résultat du calcul représentera immédiatement l'indicateur recherché sous forme de moyenne annuelle, pour toutes les sources prises en compte dans la configuration. Afin de calculer l'indicateur global pour l'ensemble du port, les résultats partiels sont **additionnés**, comme dans la méthode 1, sans autre forme de pondération.

Cette méthode 2a semble plus facile à mettre en œuvre que la méthode 2. Elle souffre cependant d'un inconvénient majeur : les résultats étant exprimés directement dans l'indicateur global (donc en tenant compte du temps de présence), l'utilisateur n'a plus accès aux niveaux sonores partiels qui pourraient être observés (mesurés) lorsque le navire est présent dans le port.

Exemple : lorsqu'un certain navire est présent dans le port, il y a un niveau de bruit L_p (ou $L_{eq,1h}$) de 55 dB(A) devant les bâtiments les plus proches. Les activités de transbordement sont limitées à 8 heures par jour, uniquement pendant la période diurne, et ont lieu pendant 40 jours par an. En calculant avec la méthode 2-bis, nous trouverions alors un résultat partiel $L_{den} = 44$ dB, correspondant à la contribution partielle de ce navire au niveau d'exposition global en L_{den} . On pourrait conclure hâtivement que ce niveau est faible, du même ordre de grandeur que le bruit de fond et ne devrait donc pas poser de problème pour le confort et la santé des résidents.

| Calcul | Configuration (bateau/quai) | Nombre de jours/an | NUIT | | | | | | | | JOUR | | | | | | | | SOIREE | | | | | | |
|--------|-----------------------------|--------------------|------|----|---|---|---|---|---|---|------|---|---|---|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|
| | | | 22 | 23 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 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 V.2 EXEMPLE DE DONNÉES D'ENTRÉE POUR LA MÉTHODE 2BIS

4.5 Cas particuliers

De (très) grands ports à haut taux de rotation peuvent être simulés par une configuration représentative. Par exemple : un port est desservi par 250 porte-conteneurs par an, chaque navire reste à quai en moyenne 4 jours. Au cours d'une journée représentative, 3 bateaux seront donc amarrés en même temps. En

choisissant soigneusement la taille et la position de ces trois navires, il est possible de simuler une journée représentative en un seul calcul. La valeur moyenne annuelle est alors égale à la valeur calculée sur un jour représentatif.

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 on combine les deux scénarios en tenant compte de la durée de chaque saison (en appliquant la méthode 2 en tenant compte du nombre de jours pour chaque période).

5. SUMMARY ELEMENTS OF THE MODEL

La validation du modèle de simulation résumé dans les sections précédentes est effectuée en suivant les étapes énumérées ci-dessous :

- Construction de la maquette numérique
- Méthodologie de mesure de la puissance par source
- Reconstruction par simulation de mesures élémentaires
- Calcul/comparaison des mesures effectuées à un point de référence sur site pendant 24 heures
- Calcul/comparaison des mesures sur un point représentatif des habitats exposés pendant 24 heures
- Comparaison entre le calcul du Lden et le suivi.

Note : Il n'existe pas de norme internationale couvrant la mesure des indicateurs sur une moyenne annuelle.

On peut se référer à la norme française NF S31-120 (décembre 2018).

5.1 L'IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.

En raison de leur nature spécifique, la modélisation acoustique des activités portuaires n'est pas aussi simple que dans le cas du bruit du trafic routier, ferroviaire ou aérien ou des activités industrielles. Ces dernières sont généralement relativement stables dans le temps et se prêtent plus facilement à des descriptions statistiques des sources de bruit, alors que les activités portuaires sont très variées, chacune fonctionnant selon son propre schéma, et ne présentent que rarement un caractère répétitif et prévisible.

Afin de modéliser correctement les activités portuaires du point de vue du bruit, il est nécessaire d'avoir une idée précise de leur fonctionnement. Une coopération étroite avec les autorités compétentes est généralement une condition nécessaire pour un tel projet.

De même, il est important de fixer les objectifs d'une étude acoustique. Alors qu'un projet de recherche tel que le RAPPORT vise avant tout à saisir et à comprendre les phénomènes et les mécanismes en jeu, une étude réelle aura pour objectif principal

de contrôler et, si possible, de réduire les nuisances sonores subies par les résidents des installations portuaires. Le choix d'un objectif va nécessairement influencer le plan de travail, les modèles à produire, les mesures à effectuer et les solutions envisageables.

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

- Identifier les principales sources de bruit, et plus particulièrement celles qui causent le plus de gêne. Ce sont ces sources qu'il faudra caractériser et modéliser de manière suffisamment détaillée pour la suite des travaux.
- La particularité du bruit : les bruits impulsifs, avec une forte composante tonale, ou fortement chargés dans les (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 provoquent. Les activités, en particulier dans les ports de petite et moyenne taille, sont très fluctuantes et les niveaux de bruit varient souvent considérablement dans le temps. La gêne occasionnée dépend fortement du moment de la journée (et en particulier des heures de 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 avoir leurs fenêtres ouvertes).
- Le choix du ou des indicateurs pertinents pour caractériser les effets étudiés. Bien que la directive européenne recommande l'utilisation des indicateurs L_{den} et L_n pour évaluer les effets du bruit sur la santé, il peut être plus pertinent de mesurer et de simuler des indicateurs qui caractérisent le bruit sur des périodes plus courtes, comme le bruit lorsqu'un navire particulier est à quai, ou pendant une phase particulière de débarquement et/ou d'embarquement. Pour caractériser de manière adéquate des événements sonores particuliers, l'utilisation d'indicateurs tels que $L_{A,max,S}$ peut être utile, bien qu'elle se prête moins bien aux simulations.
- La topographie du site et plus particulièrement la distance de la source aux agglomérations les plus proches et au relief, qui peut avoir des effets importants sur la propagation du bruit, notamment lorsqu'il induit une vue plongeante sur le port.
- Dans certains cas, les conditions météorologiques particulières existant sur le bord de mer, avec des vents dominants variant selon la saison et/ou l'heure de la journée, peuvent être une source de gêne plus grave, mais limitée dans le temps, que ne le suggère une simple moyenne annuelle.

- Intérêts économiques et touristiques, notamment lorsque les quais sont transformés en zones de promenade ou de loisirs ou lorsqu'une partie du port fait l'objet d'un réaménagement urbain.

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 fréquentent. La modélisation concerne à la fois la topographie du site et la localisation des principales sources et le fonctionnement du port dans sa dimension temporelle.

Le niveau de détail de cette modélisation doit être choisi judicieusement en fonction des objectifs poursuivis.

Les techniques utilisées pour simuler les développements futurs ne sont pas spécifiques au bruit portuaire et sont basées sur des méthodes robustes et fiables, largement développées pour d'autres types de sources.

5.1.1 Méthodes de suivi

Les différents types de méthodes de surveillance du bruit dans les zones portuaires sont décrits ci-dessous :

- **Mesures ponctuelles à proximité des sources.** Afin de caractériser séparément les sources sonores pour alimenter les modèles de prédiction du bruit, ils permettent d'estimer la puissance des sources en connaissant la distance de propagation depuis le point d'émission principal.
- **Mesures intermédiaires pour valider le modèle de prévision.** Valider la modélisation des sources en comparant les niveaux mesurés et calculés en des points spécifiques du site.
- **Surveillance acoustique et détection des anomalies.** Où les capteurs sont associés à des outils d'intelligence artificielle pour détecter et signaler les niveaux dépassant les seuils prescrits ou les nouvelles sources sonores potentiellement gênantes.
- **Mesures ponctuelles de l'exposition.** Pour une zone résidentielle ou pour l'évaluation de l'efficacité des mesures correctives mises en œuvre dans le cadre de plans d'action contre le bruit.
- **Solutions de suivi permanent et/ou ponctuel.** Ceux-ci permettent de surveiller l'exposition des résidents au bruit portuaire sur de longues périodes lorsque les capteurs sont installés de façon permanente ou sur des périodes plus courtes dans le cas d'installations temporaires. Ils comprennent un système d'enregistrement des données de mesure qui

facilite la consultation ultérieure des niveaux mesurés et le calcul d'indicateurs agrégés sur de longues périodes.

5.1.2 Types de mesures de réduction du bruit portuaire

- **Urbanisme, zonage.** Cette mesure est plus efficace si une séparation suffisante peut être garantie entre les sources de bruit et les habitats les plus proches. Cependant, elle est difficile à mettre en œuvre dans les petits ports, qui sont souvent limités par la géographie des lieux.
- **Le développement urbain.** Elle peut permettre une réduction significative du bruit propagé par l'insertion d'écrans bas, de mobilier urbain acoustique, de tranchées (même peu profondes), de toitures partielles. Dans tous les cas, le principe est de masquer les sources à la vue pour gagner 5 à 6 dB d'atténuation de la propagation.

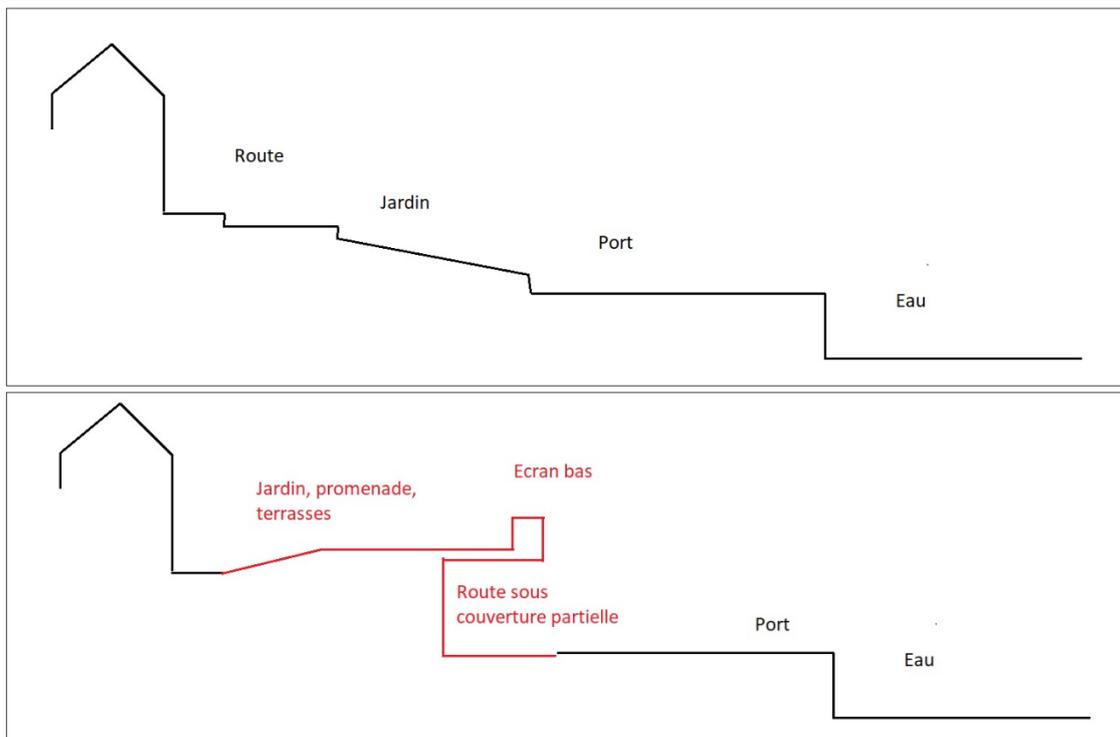


FIGURE V.3 EXEMPLE D'AMÉNAGEMENT URBAIN AVEC RÉDUCTION DU BRUIT PORTUAIRE

Ces solutions sont progressivement prises en compte dans les méthodes de prévision habituellement utilisées pour la cartographie. Le logiciel MithraSIG permet de les modéliser avec une grande précision en utilisant la méthode hybride et les extensions dédiées.

- Gestion des ports. Les autorités portuaires peuvent mettre en œuvre diverses actions appropriées telles que l'inclusion de plates-formes et la

réglementation des heures de fonctionnement. Il est également recommandé de promouvoir la consultation des résidents pour identifier d'autres solutions.

- Matériel de lavage et de manutention. Le remplacement des équipements à moteur thermique par des véhicules électriques et le remplacement des moteurs diesel par des moteurs à gaz naturel sont des solutions pour réduire la pollution environnementale et sonore.
- Bruit des transports terrestres. Le bruit des transports terrestres lié à l'activité portuaire peut également être réduit par l'installation de rocade, de parkings ou de trottoirs silencieux.
- Influences sur la propagation du bruit. L'installation d'écrans acoustiques à proximité des sources est généralement difficile en raison de l'étendue des zones d'activité. En revanche, il s'agit d'une solution efficace, mais pas très populaire si elle crée également une vue cachée, notamment sur la mer.
- Promouvoir des navires plus silencieux. L'électrification des quais est une mesure efficace permettant aux navires d'éviter d'utiliser leurs propres générateurs électriques embarqués, qui utilisent souvent des moteurs diesel. Cette mesure mérite d'être approfondie afin d'établir sa faisabilité pour différents types de navires, notamment les ferries, les cargos et les navires de croisière.

5.1.3 Méthodologies pour l'application et l'exploitation des méthodes de prévision.

Les principes méthodologiques à prendre en compte pour une application correcte des méthodes de prévision du bruit portuaire sont résumés ci-dessous.

- Tenez compte de l'indicateur pertinent sélectionné et construisez le modèle en fonction de l'objectif ;
- Sélectionnez un niveau de détail approprié au problème ;
- Couvrir toutes les activités portuaires en tenant compte de leur variabilité spatiale et temporelle ;

- **Modéliser l'AVANT de mesurer et de mesurer pour l'utiliser dans des simulations. Simuler pour évaluer la pertinence d'une mesure ;**
- Caractériser expérimentalement les sources de bruit ;
- Tenir compte des effets spécifiques tels que la géométrie des navires, la topographie du terrain et les effets météorologiques particuliers sur le bord de mer ;
- Modélisation du fonctionnement des sources sous forme de séries temporelles (24 fois 1 heure) ;
- **Modélisation des niveaux d'exposition moyenne sur de longues périodes à partir de :**
 - **La puissance équivalente par période jour, soir, nuit**
 - **L'étalement moyen annuel et saisonnier, en fonction de l'heure de la journée.**

La validation de l'outil développé par le partenaire du CSTB a été réalisée en comparant les résultats obtenus à l'aide de cet outil avec les résultats obtenus à l'aide de logiciels commerciaux actuellement disponibles pour la modélisation d'un scénario portuaire. Sur Figure V.4 les régions du port de Cagliari soumises aux simulations sont mises en évidence. Après la modélisation des scénarios, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus par les deux logiciels en termes de niveaux de bruit.

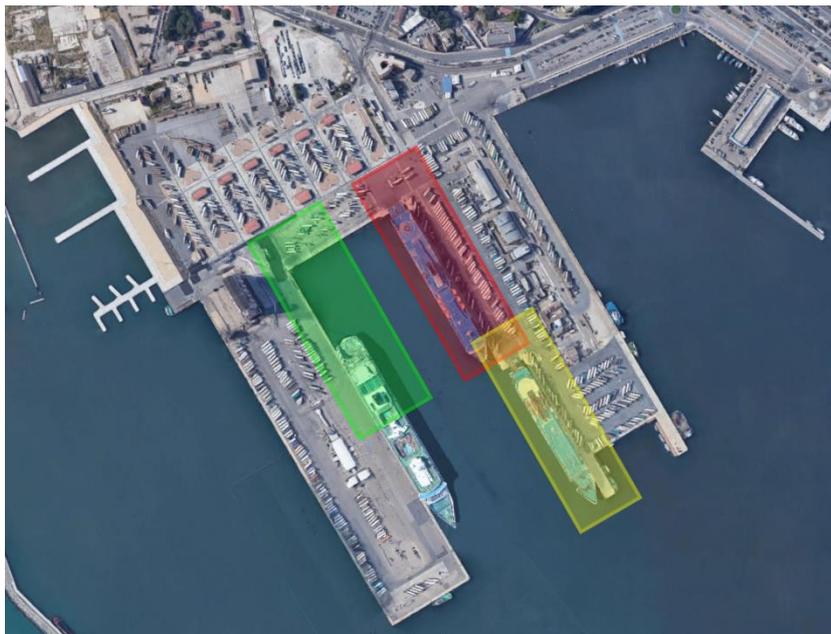


FIGURE V.4 LES JETÉES DU PORT DE CAGLIARI CORRESPONDANT AUX SCÉNARIOS MODÉLISÉS : JETÉE "SABAUDO" EN ROUGE, JETÉE "DENTE SABAUDO" EN JAUNE ET JETÉE "LEVANTE RINASCITA" EN VERT.

Un outil spécial SoundPLAN 8.1 a été utilisé pour dériver les puissances et les spectres sonores des sources présentes dans les navires, en utilisant les relations inverses du calcul de propagation. Afin d'utiliser cet outil, les trois scénarios ont d'abord été reconstitués sur SoundPLAN 8.1 en indiquant les niveaux de bruit mesurés, les emplacements des mesures et les positions des sources du navire, y compris une zone représentant les opérations de chargement et de déchargement. Une fois les caractéristiques des sources définies, il a été possible de procéder à la modélisation dans MithraSIG en utilisant l'outil Porto et les outils spécifiques au port fournis.

Malgré les diverses différences constatées entre les deux logiciels, une fois les méthodes d'entrée des données standardisées, la différence entre les résultats au niveau des récepteurs était inférieure à ± 1 dB(A) (Tableau V.8).

| Scénario | Récepteur | SoundPLAN | MithraSIG | Delta |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | L _{Aeq} diurne [dB(A)]. | L _{Aeq} jour [dB(A)]. | L _{Aeq} jour [dB(A)]. |
| Molo Sabauda | P01 - Jetée | 88.2 | 87.6 | 0.6 |
| | P02 - Fabbricatino (Bar) | 88.3 | 87.4 | 0.9 |
| Quai Dente Sabauda | P01 - Jetty | 93.8 | 93.8 | 0.0 |
| | P02 - Sabauda ext (6ème place) | 78.8 | 78.7 | 0.1 |
| Molo Levante Rinascita | P01 - Jetée | 95.3 | 95.0 | 0.3 |
| | P02 - Petite usine | 90.8 | 90.6 | 0.2 |
| | P03 - Petite usine (bar) | 73.6 | 73.6 | 0.0 |

TABLEAU V.8 COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES AVEC SOUNDPLAN ET MITHRASIG.

6. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DE LIGNES DIRECTRICES-

Nous donnons ici un résumé des résultats obtenus dans le cadre du projet DECIBEL pour leur transposition à d'autres contextes portuaires. Ces résultats sont présentés successivement dans les trois domaines suivants :

- 1/ méthodes de surveillance du bruit portuaire
- 2/ mesures de réduction du bruit
- 3/ les méthodes de prévision de l'exposition au bruit dans les ports.

6.1 *Vade-mecum sur les méthodes de suivi,*

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

- vérifier que l'objectif des plans d'action mis en place a été atteint ;
- surveiller la situation du bruit que nous avons essayé de régler au fil du temps. Là encore, la manière dont ce suivi est effectué dépendra beaucoup de l'action choisie.

6.1.1 **Vérifier l'effet du plan d'action.**

Afin de vérifier l'effet de l'action corrective, si possible, deux campagnes de mesures in situ doivent être réalisées : une avant la mise en œuvre de l'action et une après. Dans la mesure du possible, les mêmes points de mesure, périodes et indicateurs seront maintenus entre les deux campagnes.

Deux approches sont possibles :

- Nous vérifions l'objectif de réduction des nuisances sonores dans la zone concernée : dans ce cas, nous définissons plusieurs points de mesure dans la zone en question ainsi que les périodes (saison et heure de la journée) concernées et nous vérifions que les indicateurs et les seuils définis dans la phase d'analyse du plan d'action sont respectés.
- Vérifier l'objectif de réduction à la source : dans ce cas, on peut utiliser la méthode de caractérisation du niveau de puissance de la source, ou encore observer le changement des conditions de fonctionnement.

Si une seule campagne de mesure est possible, elle sera effectuée après la réalisation de l'action et dans ce cas, on tentera de vérifier le respect de l'objectif, de préférence au niveau de la source (vérification de la diminution du niveau de puissance ou des nouvelles conditions de fonctionnement).

6.1.2 **Suivi de l'effet du plan d'action dans le temps.**

En fonction de l'action, il peut également être nécessaire de vérifier son effet sur la réduction des nuisances sonores à long terme. Cette pratique est particulièrement recommandée lorsque l'action consiste à mettre en œuvre une solution technique

qui peut potentiellement être endommagée dans le temps. Ce serait le cas, par exemple, d'un revêtement routier ou même d'une modification technique sur une source de bruit.

Dans ce cas, il est conseillé de proposer une méthode de suivi ainsi qu'une fréquence de suivi (par exemple, tous les ans) lors de la définition du plan d'action. La méthode peut être de différents types selon la solution et la fréquence : vérification visuelle, mesure acoustique dans une zone d'intérêt, mesure de caractérisation d'une source, voire remplacement de la solution. Celle-ci sera définie en fonction des actions et des capacités des acteurs concernés.

6.2 Type de mesures de réduction du bruit.

Après le diagnostic de la situation existante, les actions possibles pour réduire la pollution sonore dépendent beaucoup de la source concernée et aussi du niveau de réduction que vous essayez d'atteindre. Nous rappelons ici quelques principes généraux suivis de quelques exemples.

6.2.1 Principes d'établissement du plan d'action.

- Réunir les parties prenantes, leur présenter les conclusions du diagnostic, et établir avec elles un cadre d'actions possibles (en effet, en fonction des intérêts et des possibilités techniques et financières, il est clair que toutes les actions ne seront pas possibles).
- A partir de l'analyse et du cadre des actions possibles, proposer des objectifs qualitatifs d'ambition différenciée (réduction modérée, moyenne ou forte) et si possible y associer des éléments de coût.
- Traduire chaque objectif qualitatif en un objectif quantitatif dans les zones en jeu, en utilisant le(s) même(s) indicateur(s) que celui/ceux avec lequel/lesquels la pollution sonore a été établie (typiquement, nous pouvons fixer comme objectif que l'indicateur utilisé dans la zone en jeu soit inférieur à la valeur seuil fixée dans l'analyse)
- En utilisant le modèle de calcul, établir l'objectif de réduction de la source principale pour atteindre l'objectif de réduction dans les zones concernées, par exemple en identifiant la réduction nécessaire du niveau de puissance ou même le changement nécessaire dans le scénario quotidien d'"activation" de la source principale concernée.
- Identifier les possibilités et les contraintes (techniques, administratives, financières, etc.) pour atteindre l'objectif de réduction à la source avec les parties prenantes : est-il possible de changer l'équipement, d'ajouter une protection auditive (couverture, écran, etc.), de modifier les conditions de fonctionnement (changement de vitesse, diminution de la vitesse, etc.) ?

- Identifier une ou plusieurs stratégies possibles par objectif qualitatif, en fonction des contraintes.
- Réunissez toutes les parties prenantes, proposez-leur les stratégies identifiées et concluez sur les actions à entreprendre.

6.2.2 Exemples de stratégies de réduction.

En général, les mesures de réduction peuvent inclure les points suivants :

- Réduire le bruit du trafic routier ou des déplacements horizontaux : les opérateurs ferroviaires doivent limiter les émissions sonores, limiter la vitesse de circulation, limiter l'utilisation de véhicules bruyants, modifier le revêtement de la route, installer un mur antibruit, ...
- Réduire le bruit des navires : limiter l'utilisation des sources de bruit à l'approche ou à quai, décaler les horaires de travail, allonger les périodes de chargement/déchargement, remplacer un élément bruyant du navire, installer un dispositif à quai, ...
- Réduire le bruit des équipements industriels : modifier les conditions de fonctionnement pour qu'elles soient moins gênantes, installer un carénage, ...
- Prendre des mesures dans les zones concernées, par exemple en remplaçant les fenêtres dans le cas d'un bâtiment isolé où l'on constate une 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'un enrobé phonique pour la réduction du bruit routier
- Installation d'amortisseurs de vibrations pour réduire le bruit d'impact généré par l'embarquement et le débarquement des véhicules des navires
- Installation d'une électrification des quais pour supprimer le bruit des générateurs embarqués nécessitant le fonctionnement des moteurs thermiques du navire et la ventilation associée à ces moteurs.
- Remplacement des véhicules commerciaux à moteur thermique utilisés dans les ports par des véhicules électriques.

6.3 *Vademecum / méthodologies pour l'application des méthodes de prévision.*

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

6.3.1 Étape 1 - Identification des parties concernées.

Étant donné le positionnement des ports insulaires urbains en tant que zones d'interface, il est nécessaire d'identifier les parties prenantes des activités portuaires, afin de comparer le bénéfice socio-économique des activités portuaires par rapport à la pollution sonore potentielle générée, ainsi que la responsabilité éventuelle de chaque partie prenante par rapport à la génération de la pollution sonore.

Par ailleurs, afin de cibler au mieux le diagnostic sur les principaux problèmes de bruit, il est nécessaire d'identifier si des plaintes formelles ou informelles ont été déposées par les riverains de la zone portuaire. Cela permet à l'analyse de se concentrer sur les sources de bruit les plus problématiques, ce qui est essentiel étant donné le grand nombre de sources de bruit dans une zone portuaire.

6.3.2 Phase 2 - Définition des limites spatiales de l'étude.

On tente de définir deux zones géographiques au niveau général : la zone géographique d'émission du bruit où l'on considère que les sources sonores proviennent de l'activité portuaire et la zone géographique d'impact du bruit où ces bruits peuvent causer des nuisances sonores.

La zone géographique d'émission du bruit est constituée de :

- de tout ou partie du port lui-même, au sens juridique du terme,
- un segment des voies de transport maritime, routier et ferroviaire situé à l'extérieur du port mais dont l'activité est considérée comme faisant partie de l'ensemble des bruits générés par l'activité portuaire,
- tout autre élément bruyant situé à l'extérieur du port mais considéré comme faisant partie du bruit total généré par l'activité portuaire.
- La zone géographique d'impact du bruit doit comprendre :
 - tous les points ou zones de réception pour lesquels l'impact sonore du port, d'une activité portuaire particulière ou d'une solution de réduction du bruit doit être évalué ou mesuré,
 - la zone d'influence de la propagation sonore, c'est-à-dire (généralement pour les experts) l'ensemble des éléments topographiques et constructifs qui permettent de prévoir, avec une précision suffisante, la propagation du bruit entre tous les éléments sources d'intérêt et tous les points et zones de réception.

Une bonne définition de ces zones permettra de limiter les trop nombreuses données géographiques (terrain, routes, bâtiments, etc.) qui n'ont quasiment aucune influence sur les calculs de prévision, et d'optimiser les temps de simulation.

6.3.3 Étape 3 - Fonctionnement de la porte et identification de la source.

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

Les points suivants doivent donc être définis pour chaque source :

- Le type de source
- Périodes de variabilité annuelle, représentatives d'un fonctionnement suffisamment différencié, typiquement les saisons d'activité (basse, moyenne et haute) ou la distinction entre jour de semaine et week-end.
- Le scénario d'activation journalier, précisant le soir le pourcentage de temps d'activation de la source, c'est-à-dire le nombre et la durée moyenne d'activation de la source, par heure de la journée, pour chaque période annuelle représentative (par exemple le nombre d'embarquements et de débarquements).
- Une brève explication de la source (qu'est-ce qui émet le bruit ? quelles sont les conditions de déclenchement possibles ?).

Le cas échéant, les sources peuvent être décrites comme ayant un scénario d'utilisation très simple, par exemple "continu". Ce serait par exemple le cas du trafic routier sur les routes communales, qui n'est décrit que par un chiffre quotidien moyen, tel que le trafic journalier moyen annuel (TMJA).

6.3.4 Étape 4 : Collectez les données nécessaires.

Une fois les principales sources identifiées et définies, toutes les données nécessaires à la construction du modèle et aux calculs de prévision doivent être collectées dans les zones spatiales définies à l'étape 2. Les données nécessaires sont énumérées ci-dessous.

Données géographiques (géoréférencées).

- Topographie / terrain
- Bâtiments : définis par le plan et la hauteur ou de simples volumes, avec si possible un attribut d'usage (résidentiel, tertiaire, etc.).
- Utilisation du sol : plans d'eau, parcs, parkings, etc.
- Sections de routes éventuellement classées par infrastructure, y compris le type d'asphalte.
- Sections de lignes ferroviaires
- Limite terrestre/maritime et limite administrative du port.

Ces données seront de préférence fournies au format SIG (par exemple le format SHP) et géoréférencées. En ce qui concerne les bâtiments, on peut mentionner que les conteneurs ou les remorques devraient être modélisés a priori comme des bâtiments tant que leur taille est significative.

Données sur le trafic terrestre.

- Trafic routier : données relatives au volume de trafic (TMJA ou trafic moyen par période journalière) et au pourcentage de véhicules lourds, associées à des tronçons routiers (si possible sous la forme d'attributs liés à des objets de tronçon).
- Trafic ferroviaire : données sur le nombre de passages horaires et le type de convois ferroviaires, associées à des tronçons routiers (si possible sous la forme d'attributs liés à des objets de tronçon).

En ce qui concerne le pourcentage de poids lourds, en l'absence de données plus précises, un pourcentage unique peut être défini pour l'ensemble du réseau routier (par exemple 10%).

Données sur le trafic maritime.

- Trajectoire, lieu et position du poste d'amarrage dans le port et heures d'arrivée/départ des navires, par période annuelle d'intérêt et par heure du jour
- Description géométrique des navires (longueur, hauteur au-dessus de l'eau, largeur)
- Ces données peuvent être demandées à l'autorité de gestion du port étudié ou, à défaut, aux entreprises qui exploitent les routes maritimes à destination et en provenance du port étudié.
- Données sur le niveau de puissance des sources de bruit (à l'exclusion du trafic "normal")
- Niveaux de puissance : par bande de fréquence (tiers d'octave ou octave), au moins de 100 à 5000 Hz, voire plus si la source a un contenu fréquentiel important en dehors de ces valeurs.
- Directivité, qui peut être supposée par défaut être omnidirectionnelle pour les sources ponctuelles et hémisphérique pour les sources proches du sol ou contiguës à un grand objet (tel qu'un navire ou un bâtiment).

Dans la plupart des cas, ces données nécessitent une campagne de mesure spécifique. Par exemple, il est possible d'effectuer une série de mesures de niveau de pression L_p à proximité des sources à caractériser (typiquement moins de 10 m) et d'en déduire 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 mesure) :

$$L_w = L_p + 10 \log(4\pi r^2)$$
 dans le cas d'une grande source non obstruée à proximité (source de champ libre omnidirectionnelle).

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

Ces relations sont approximatives et ne sont valables que lorsque le microphone de mesure est suffisamment éloigné d'un objet réfléchissant.

En outre, dans la mesure du possible, des enregistrements audio et vidéo des séquences mesurées doivent également être utilisés afin de faciliter la compréhension a posteriori du fonctionnement des sources qui ont été caractérisées.

Données météorologiques.

Les données météorologiques sur une année, par heure et classées comme jour/nuit, y compris :

- la vitesse moyenne du vent mesurée à une certaine hauteur au-dessus du sol (par exemple 10 m),
- la direction moyenne du vent (où le vent souffle par rapport au nord), en degrés
- la nébulosité (par exemple, mesurée en octa, de 0 à 8)

Ces données peuvent provenir d'une station de mesure exploitée par un organisme national (Météo France ou MétéoAM) ou régional, même si elle se trouve à plusieurs kilomètres du port. Les données météorologiques doivent ensuite être traitées pour établir une liste d'occurrences de conditions favorables, en fonction de la direction du vent et de la période (voir étape 5).

Note en cas de difficultés à obtenir certaines données.

Certaines données peuvent être difficiles à acquérir, notamment des données topographiques précises ou encore des données météorologiques. Dans ce cas, il est recommandé à l'équipe d'étude d'utiliser autant que possible des bases de données ouvertes, par exemple :

- OpenStreetMap pour les données géographiques générales (bâtiments, routes, etc.).
- Données SRTM pour la topographie
- la base de données des sources sonores du projet Imagine (par exemple, accessible via l'outil SourceDB)

Nous pouvons mentionner que le logiciel MithraSIG v5 développé par Geomod et le CSTB possède plusieurs fonctionnalités qui facilitent l'intégration à partir de ces bases de données ouvertes.

Pour les données météorologiques, veuillez vous référer à la section de l'étape 5.

6.3.5 Étape 5 - Création du modèle et calcul des indicateurs acoustiques

Une fois les données recueillies, il est conseillé d'utiliser un logiciel d'étude d'impact sonore qui permet de créer un modèle de calcul qui peut ensuite être utilisé pour

quantifier la pollution sonore. Le processus d'intégration de toutes les données dans le modèle est spécifique à chaque outil, et nous nous référerons donc au manuel d'utilisation du logiciel choisi. Cependant, nous précisons 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.

Il est proposé d'adopter comme méthode de prévision CNOSSOS-EU qui est la nouvelle méthode d'évaluation des indicateurs de bruit de la directive (UE) 2015/996. Cette dernière suit la directive END en modifiant notamment l'annexe 2 où les méthodes de prédiction sont spécifiées pour introduire un modèle d'ingénierie unifié CNOSSOS-UE obligatoire pour toutes les cartographies stratégiques du bruit (CSB) après le 1er janvier 2019. La partie 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 du bruit des zones portuaires ou les phénomènes de diffraction par les obstacles, de réflexion/absorption et de multiréflexion par les surfaces et les bâtiments, les effets de sol, ainsi que les effets météorologiques moyens agissant sur la réfraction des ondes sonores à longue distance, sont modélisés avec une précision suffisante mais sans avoir besoin de données non nécessaires au résultat recherché.

Dans CNOSSOS-EU, les sources sonores peuvent être décrites comme ponctuelles, linéaires, surfaciques ou même volumiques, en tenant compte d'une éventuelle directivité spatiale. Pour la caractérisation du bruit des ports insulaires, la description des sources sonores pertinentes peut être réalisée de deux manières : soit en considérant qu'il s'agit du bruit du trafic routier ou ferroviaire classique auquel cas la méthode CNOSSOS-UE peut être appliquée, soit en considérant qu'il s'agit d'un bruit particulier (cheminée, ventilation, manutention, rejet, etc.) auquel cas un modèle sera réalisé à partir d'une ou plusieurs sources ponctuelles et/ou linéaires, à déterminer par des mesures in situ ou à partir des résultats de la littérature.

Prise en compte des conditions météorologiques locales

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

Dans le CNOSSOS-EU, la grandeur physique évaluée est le niveau sonore à long terme. *LLT* Ce calcul est d'abord effectué pour chaque chemin sonore *i* (c'est-à-

dire LLT, i) et le niveau sonore total au niveau du récepteur est finalement obtenu en additionnant les différents niveaux à long terme spécifiques à chaque voie.

Le niveau LLT, i est calculé pour une période de jour (6h00 à 18h00 pour la France), une période de soirée (18h00 à 22h00) et une période de nuit (22h00 à 6h00). Il prend en compte l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées sur le site et est calculé en additionnant l'énergie du niveau sonore dans les conditions favorables à la propagation. LF, i et du niveau dans des conditions homogènes ou défavorables LH, i pondéré 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 ci-dessus, il est important de noter que p est fonction de trois paramètres : le lieu étudié (par exemple Bastia), la période d'étude (jour, soir, nuit) et la direction moyenne du trajet du son (par exemple nord-ouest à sud-est).

La détermination des conditions de propagation du son s'effectue sur la base de la connaissance de la structure thermique et aérodynamique de l'atmosphère dans ses couches inférieures. Le lecteur se reportera au projet DECIBEL pour une description détaillée de la méthode permettant d'obtenir les conditions de propagation à partir des paramètres météorologiques donnés à l'étape 4.

Note : stratégie possible en l'absence de données météorologiques spécifiques.

Il peut être difficile d'obtenir les données météorologiques nécessaires pour créer les conditions favorables à l'apparition du rose. Dans les cas où ces données ne sont pas accessibles, nous pouvons adopter une approche forfaitaire, qui se veut essentiellement une approche conservatrice, c'est-à-dire essayer de ne pas sous-estimer les niveaux, quitte à les surestimer. Par exemple, nous pouvons supposer des conditions favorables à 100% (c'est-à-dire $p = 1$) la nuit et à 50% ($p = 0,5$) le jour, pour toutes les directions du vent, comme le suggère la méthode de calcul française.

Autres conseils pour effectuer des calculs.

En ce qui concerne les sources sonores, elles sont nécessaires dans le modèle :

- présenter les sources spécifiques au port et leur scénario d'utilisation, telles que les sources ponctuelles, linéaires et de surface
- accorder une attention particulière à la modélisation des navires qui peuvent être considérés, vus de l'extérieur, comme un bâtiment avec des sources sonores à ses limites,
- être en mesure d'enregistrer la contribution sonore de chaque source pour la phase d'analyse.

En ce qui concerne les paramètres de propagation du son, on considère que :

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

- les conteneurs sont modélisés comme des bâtiments réfléchissants dont les dimensions (L x P x H) doivent être spécifiées,
- Les piliers, en particulier ceux qui comportent des murs ou des brise-lames, doivent être soigneusement façonnés.

En outre, il est recommandé de prendre en compte au moins 3 considérations dans le calcul ; cette recommandation doit être adaptée en fonction de la taille de la zone d'étude et de la puissance de calcul disponible.

Définition des zones réceptrices.

Une fois que vous avez saisi tous les paramètres du modèle, vous devez définir la zone géographique pour laquelle vous souhaitez évaluer et étudier la pollution sonore. Nous pouvons utiliser différents types de zones en fonction du problème :

- Sur la façade des bâtiments résidentiels, qui est généralement utilisée dans les approches réglementaires
- Sur une surface horizontale définissant un espace public particulier, tel qu'une place près du port, à 1,5 m de hauteur (c'est-à-dire à hauteur d'oreille humaine)
- Des points d'accueil spécifiques, par exemple au bord du terrain en cas de plainte.

Définition d'indicateurs pertinents.

Différents types d'indicateurs peuvent être évalués au niveau des récepteurs, en fonction du problème étudié :

- LAeq, niveau sonore moyen (ou niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A), qui peut être évalué par heure ou par tranche horaire spécifique, par exemple 6-8, 18-20, jour (6-18), soirée (18h00-22h00) et nuit (22h00-6h00).
- Lden et Ln, indicateurs d'exposition à long terme utilisés dans les directives de la CND
- Le ΔL , l'émergence du son (ou la différence des niveaux sonores moyens),
- Le LAmax, niveau sonore maximal (pondéré A), peut être défini comme la valeur maximale du niveau de pression pour une intégration "lente" (intégration exponentielle sur 1 s), c'est-à-dire le LpAs, max.

Il est proposé d'évaluer l'activité générale du port au moyen du LAeq horaire, ceci pour chaque heure, soit 24 valeurs. D'autres tranches horaires, pertinentes pour les opérations portuaires, peuvent être proposées et obtenues en agrégeant les résultats horaires. Comme spécifié à l'étape 3, les calculs doivent être effectués pour chacune des périodes de variabilité annuelle. Il est également recommandé d'enregistrer les contributions de chaque type de source dans les calculs afin de faciliter l'analyse. De cette façon, il sera possible de visualiser le niveau sonore reçu

d'un seul type de source en fonctionnement, par exemple le bruit généré par le débarquement d'un navire de 6h00 à 8h00.

Si nécessaire, nous pouvons évaluer l'impact de tout ou partie de l'activité portuaire par le ΔL , la différence de niveau sonore avec et sans activité (" on/off " en d'autres termes). Dans ce cas, le bruit résiduel (bruit de fond) au niveau de l'aire de réception peut être évalué par le bruit de tout type de source autre que celle étudiée.

Ce n'est que dans certains cas très particuliers de bruit impulsif ou de forte intensité mais restant très ponctuel, et donc uniquement pour la caractérisation de réception de ces sources particulières, que l'on peut utiliser le L_{Amax} avec un niveau de puissance sonore maximal comme donnée d'entrée au niveau de la source impulsive dans le modèle de prédiction.

6.3.6 Étape 6 - Analyse des résultats.

A partir des résultats du calcul, il convient de procéder à une analyse détaillée des résultats en fonction des sources sélectionnées et des indicateurs pertinents identifiés. Cette analyse dépend fortement des questions et des indicateurs sélectionnés, mais nous pouvons mentionner que nous pouvons nous concentrer sur les aspects suivants :

- Mise en perspective des résultats avec les réglementations portuaires locales
- Proposition de valeurs seuils reflétant des valeurs de bruit excessives, variant en fonction des indicateurs.
- Identification des zones spatiales et des périodes de temps en jeu (où un ou plusieurs indicateurs dépassent les seuils).
- Analyse comparative de la contribution des différents types de sources au niveau de bruit, qui permettra de comprendre les principales sources de pollution sonore à un endroit donné.
- La présentation des résultats : zones horizontales où un seuil est dépassé pour un indicateur, coloration des bâtiments où un point de la façade dépasse un seuil, comparaison des sources et conclusion sur les sources prédominantes à travailler.

En ce qui concerne les valeurs seuils pertinentes, il appartient a priori au demandeur de l'étude de les définir, en se basant par exemple sur la réglementation française ou italienne, ou sur des recommandations telles que celles de l'OMS pour le bruit dans l'environnement en Europe.

Cette phase doit se conclure par une description précise des zones et des périodes en question (où les indicateurs sont dépassés), ainsi que par l'identification des principales sources à l'origine de la pollution sonore dans ces zones. Ceci est nécessaire pour pouvoir commencer le plan d'action.

SEZIONE VI. L'ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES EN FONCTION DE L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS DE CIRCULATION DUE AUX MESURES DE GESTION ET DE RÉGLEMENTATION

1. INTRODUCTION

Cette section décrit les activités et les résultats de l'analyse du climat acoustique et du régime de mouvement et de la composition du trafic, en fonction des conditions infrastructurelles à la limite, en référence au front de mer du port de la ville pilote d'Olbia, dans le but de développer un modèle de prédiction du bruit du trafic avec l'application de réseaux neuronaux artificiels pour soutenir les interventions de gestion et de régulation.

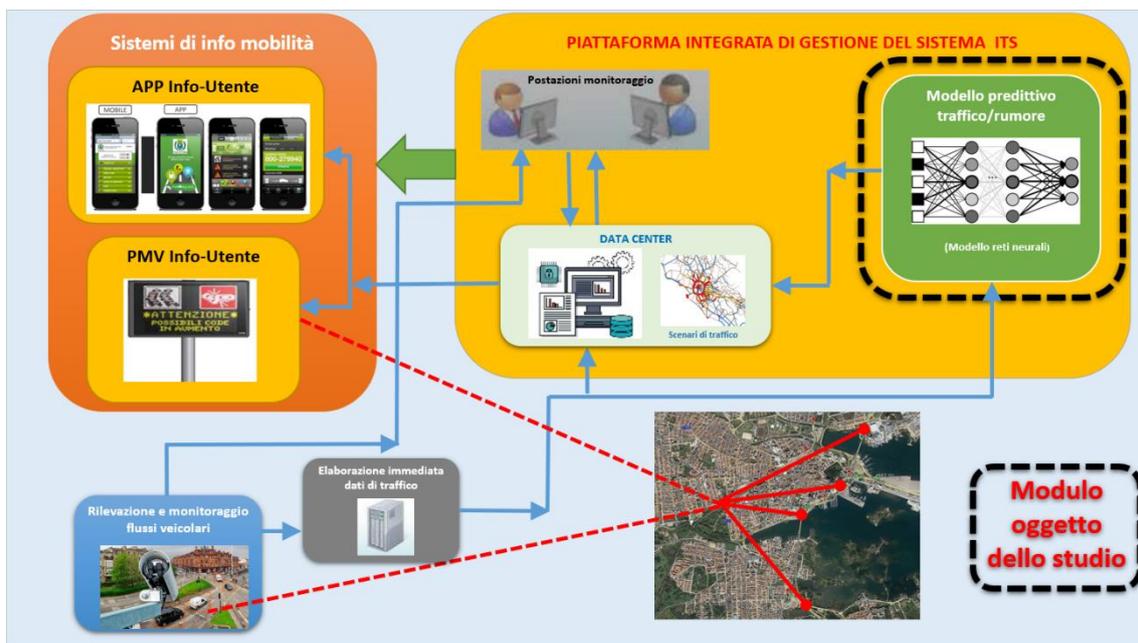


FIGURE VI.5 - DIAGRAMME SCHEMATIQUE DU SYSTEME ITS

Dans la première partie de l'étude (produit T2.2.1) seront illustrés les résultats des enquêtes simultanées sur le trafic et le 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, par le biais de messages d'information à l'intention de 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 chemins

alternatifs. L'objectif du système ITS est de rediriger 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 sur le front urbain du port et donc de réduire les niveaux d'émissions sonores.

2. ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES FLUX DE TRAFIC ET DES ÉMISSIONS SONORES

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 acoustique prévisionnel.

Des données d'information ont été collectées, également sur une 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 tronçons 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 des véhicules. 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 vérification et priorisation des ressources, 10 sections de route ont été identifiées pour la surveillance du trafic et les 3 points d'acquisition du bruit ont été confirmés pour toute la campagne.

| Id | Localisation | Type d'enquête | Coordonnées |
|--------|---|------------------------|--------------------------|
| Pos. A | Rotonde du Sacré-Cœur | Unité de contrôle fixe | 4530549.91 N 542697.09 E |
| Pos. B | Via Principe Umberto en face de l'hôtel | Unité de contrôle fixe | 4530339.13 N 542530.94 E |
| Pos. C | Via Genova, entrée du métro | Unité de contrôle fixe | 4530164.33 N 542339.46 E |

TABLEAU VI.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 emplacements 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 de l'enquête phonométrique de la campagne de surveillance sont fonctionnelles pour la détermination du climat acoustique de l'état actuel à la fois dans la période douce et dans la période de pointe, et pour la mise en œuvre d'un modèle de prévision du climat acoustique lorsque la configuration des flux de véhicules change, comme indiqué dans les paragraphes suivants.



FIGURE VI.6 - POSITIONS DES LEVES PHONOMETRIQUES SUR LES ORTHOPHOTOS

2.2 ÉTUDES ACOUSTIQUES ET DE TRAFIC [□]

Cette section décrit les activités d'enquête parallèles sur le bruit et le trafic de véhicules dans des conditions "ex ante" aux périodes "douce" et "de pointe" prévues sur la base des résultats de l'analyse cognitive préliminaire.

2.2.1 Base de données sur le bruit et le 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 du "pic" 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 Méthodes d'exécution des mesures du son

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 acquisitions, 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.

Au cours des mesures, les valeurs moyennes des grandeurs acoustiques suivantes ont été acquises et enregistrées numériquement, avec une base de temps de 100 [ms] : évolution 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).

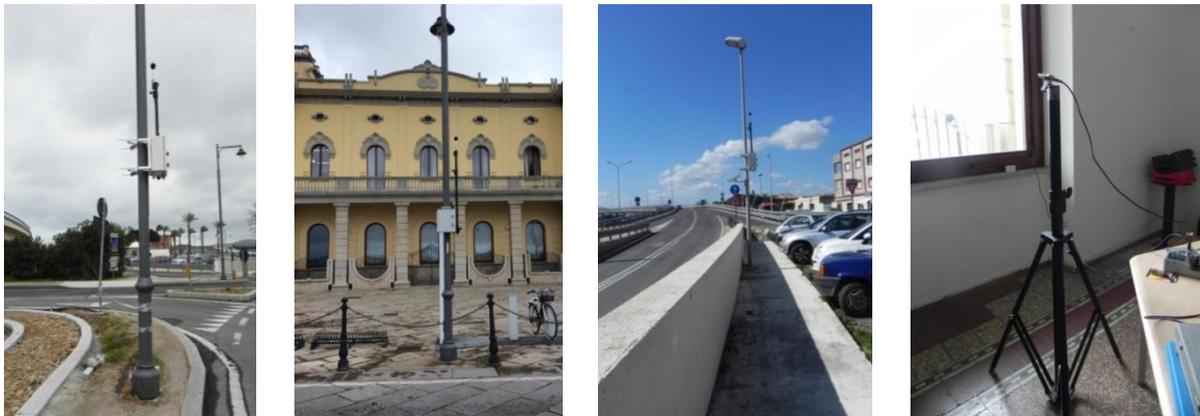
Les chaînes de mesure du niveau de pression acoustique utilisées ont capturé et stocké des données physiques dans les domaines temporel et fréquentiel par bandes normalisées de 1/3 d'octave.

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 station d'acquisition installée près des routes surveillées¹.

2.2.3 Réalisation de mesures de bruit ex-ante (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 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 VI.7 - LIEUX D'ENQUETE PHONOMETRIQUE EX ANTE CAMPAGNE PERIODE DOUCE (MARS 2019).

En plus des positions de relevé "source orientée", pour une plus grande complétude du relevé du climat acoustique, une station phonométrique intérieure a également été ajoutée (position du 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 aux relevés phonométriques et de flux de trafic.

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

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 nocturnes et 3 TR diurnes détectés.

¹Station de détection installée dans le musée archéologique municipal

Les mesures ont été effectuées aux mêmes endroits fixes que pendant 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 VI.8 - STATIONS DE MESURE DES NIVEAUX SONORES EN PERIODE DE POINTE DE LA CAMPAGNE EX ANTE (AOUT 2019).

2.2.5 Comment étudier les flux de trafic

Afin d'obtenir 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 menées en mode vidéo par l'acquisition continue d'images sur 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 VI.9 - SECTIONS DE L'ENQUETE SUR LES FLUX DE TRAFIC

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

Le rapport d'enquête contient, pour chaque section individuelle, le nombre de véhicules ventilés par direction et par classe de véhicules, à la fois à l'heure 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.

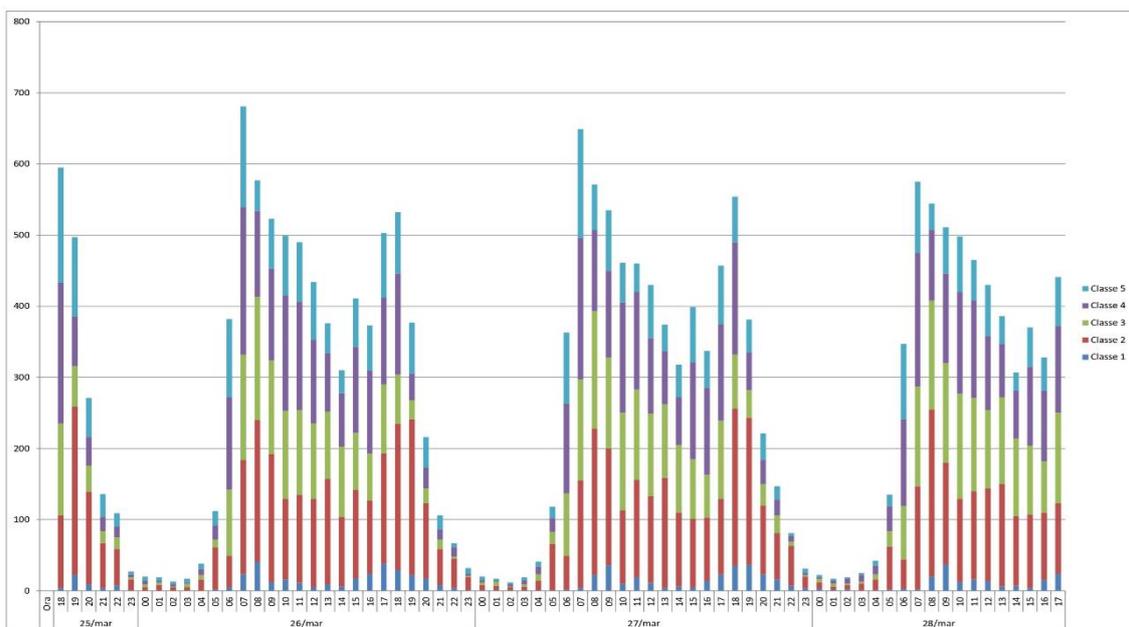


FIGURE VI.10 - GRAPHIQUE GLOBAL CUMULE DES FLUX DE TRAFIC SECTION 3C DIR. 1 PERIODE DOUCE

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.

Pour cette phase également, le rapport d'enquête contient, pour chaque section individuelle, le nombre de véhicules divisé 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.

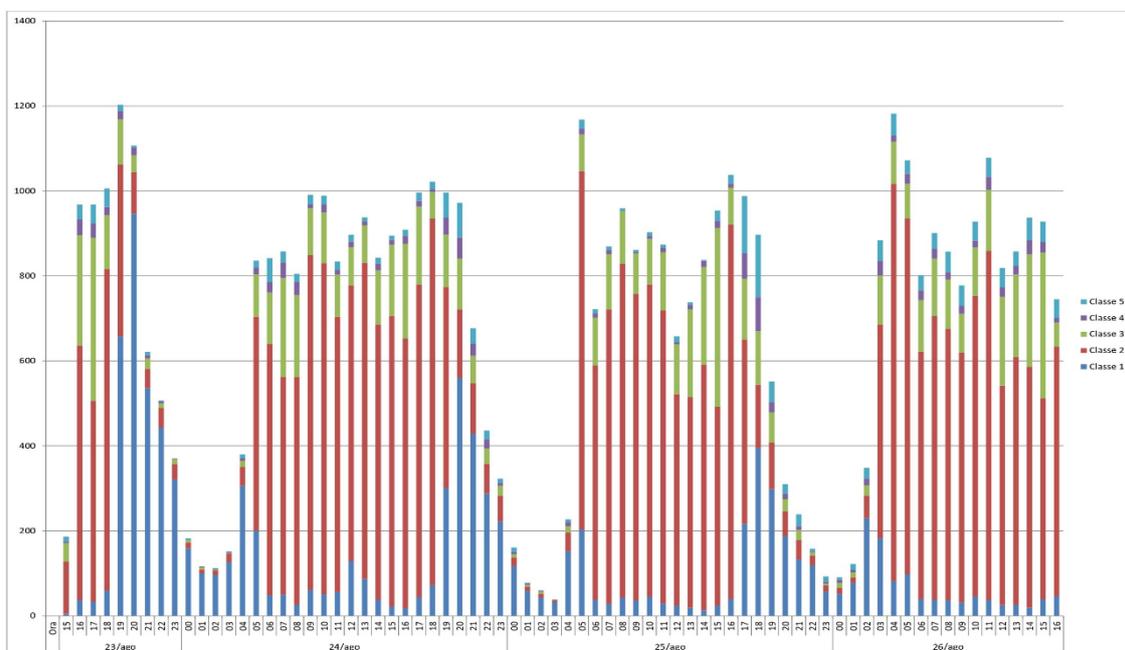


FIGURE VI.11 - GRAPHIQUE GLOBAL CUMULE DES FLUX DE TRAFIC SECTION 3C DIR. 1 PERIODE DE POINTE

3. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU BRUIT DE LA CIRCULATION

3.1 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL DE PRÉVISION DES ÉMISSIONS SONORES

3.1.1 Développement d'un modèle prédictif du bruit de la circulation.

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 bruyant, mais sans nécessairement disposer de 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 d'une connaissance partielle du phénomène, il a été envisagé d'utiliser un système de reconnaissance basé sur l'apprentissage d'un réseau de neurones. (Lecun et al., 2015; Schmidhuber, 2015). C'est vers un tel système de reconnaissance que nous nous tournons, pour sa capacité à généraliser les résultats et à associer la réponse correcte également à des signaux d'entrée non (jamais explicitement) envisagés auparavant, ou avec des informations manquantes ou partiellement compromises. (Erhan et al., 2014).

Lors de la mise en œuvre d'un modèle basé sur des réseaux neuronaux, on peut généralement identifier les procédures suivantes.

Procédure d'entraînement, 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 à partir de certaines réalisations expérimentales des événements de bruit qui ont été mesurés tout au long de la période de mesure.

Procédure de test, 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 à des cas, appelés ensembles de test, qui n'ont pas été envisagés auparavant dans l'ensemble d'apprentissage.

Procédure de normalisation, dans laquelle l'ensemble des données expérimentales du flux de véhicules est d'abord soumis à une normalisation afin d'éviter que les valeurs maximales et minimales de l'ensemble d'essai, qui dépassent les valeurs maximales et minimales de l'ensemble d'apprentissage, ne provoquent une saturation de la fonction de transfert du réseau.

Le modèle a été mis en œuvre avec des enquêtes sur le trafic et le bruit pendant les périodes de mesure du 25 au 28 mars et du 23 au 26 août 2019, structurées en séries avec une résolution temporelle toutes les 60 secondes.

L'architecture de réseau neuronal "prédictions de séries temporelles", identifiant initialement comme domaine de sortie la tendance temporelle de la pression acoustique et adoptant la stratégie d'apprentissage "*intervalle de temps unique*", 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.

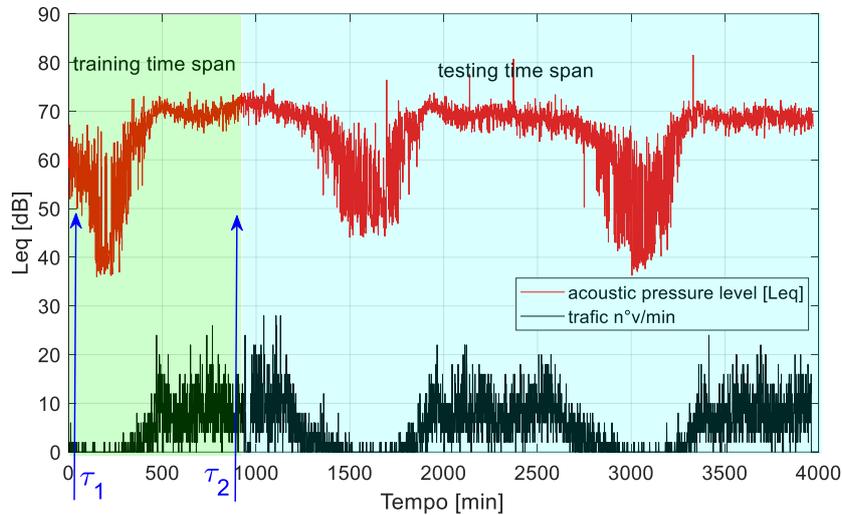


FIGURE VI.12 - TENDANCE DE LA CIRCULATION DES VEHICULES ET DU BRUIT DETECTE. LES PERIODES AUXQUELLES SE RAPPORTENT LES DONNEES CONSIDEREES POUR L'ENSEMBLE D'ENTRAINEMENT ET L'ENSEMBLE DE TEST AVEC LA DEUXIEME STRATEGIE SONT MISES EN EVIDENCE.

3.1.2 Résultats du modèle neuronal

Les quantités suivantes ont été comparées :

la valeur simulée par le modèle neuronal en réponse à la réalisation générique du trafic qui s'est produite pendant le ième intervalle.

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

L'évolution de l'erreur entre les deux quantités est illustrée dans le tableau suivant Figure VI.13. Comme on peut le voir, l'erreur reste inférieure à 1 dB pendant toute la durée de la mesure par rapport à la phase de test.

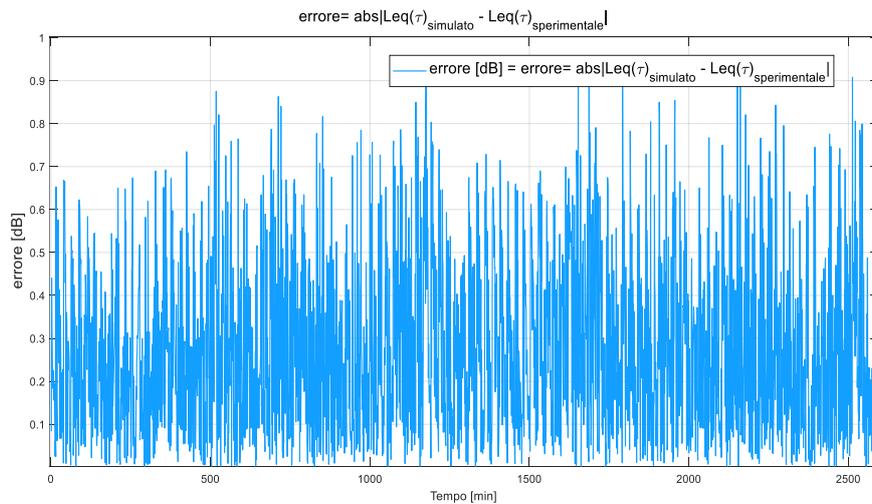


FIGURE VI.13 - ERREUR PENDANT LA PHASE DE TEST ENTRE LES VALEURS MESUREES ET LES VALEURS SIMULEES PAR LE MODELE.

Sur Figure VI.14 et dans le Figure VI.15 ci-dessous sont 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 ligne de temps 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 relatifs à la position phonométrique A (rond-point du Sacré-Cœur, mars-août 2019) sont rapportés de manière synthétique. 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.

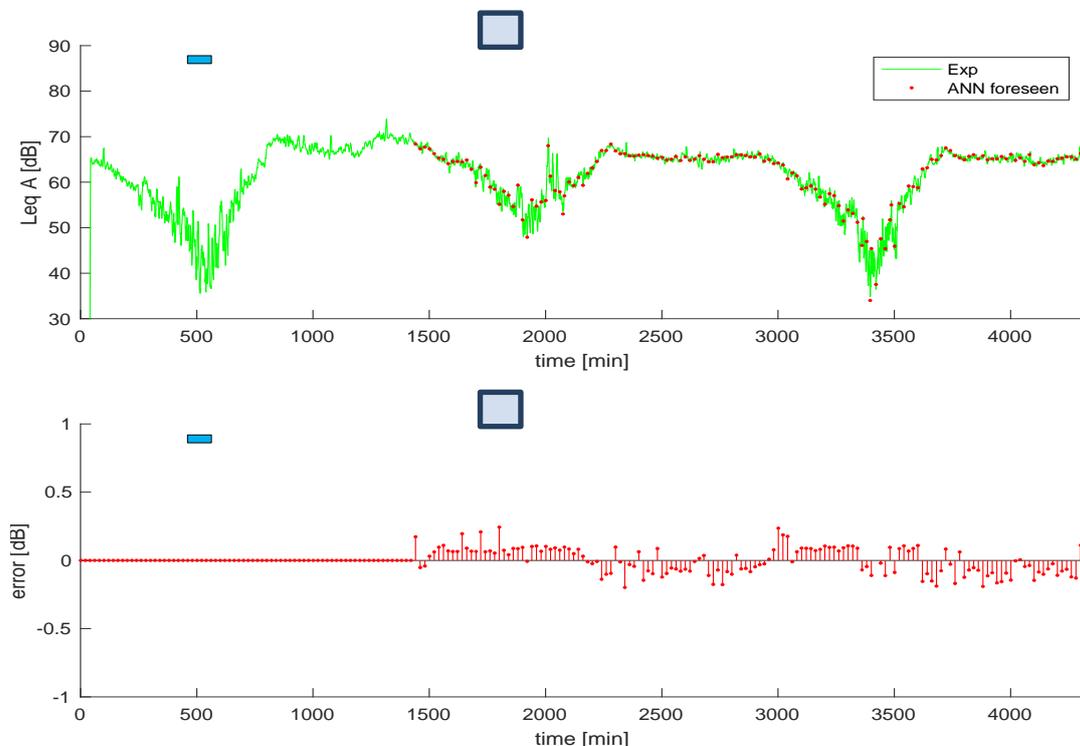


FIGURE VI.14 - LEQA ACQUIS EXPERIMENTALEMENT (VERT) ET PREDIT PAR ANN (POINTS ROUGES), EN HAUT. DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS CALCULEES ET EXPERIMENTALES, EN BAS. STATION A : PERIODE DOUCE DU 25 AU 28 MARS 2019.

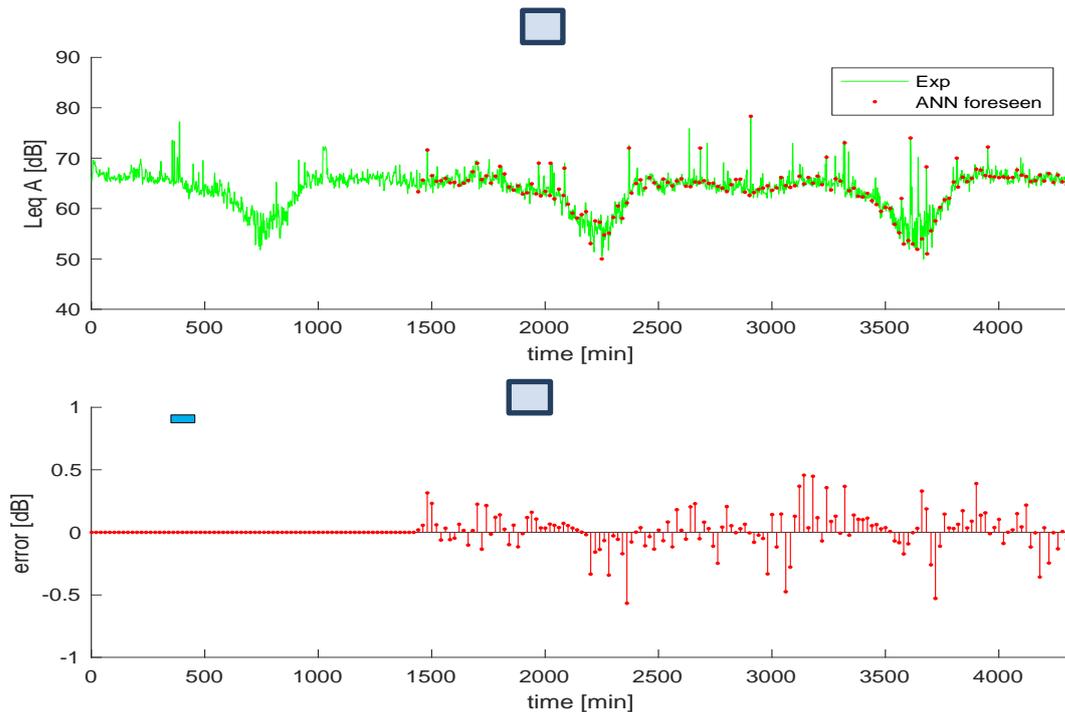


FIGURE VI.15 - LEqA ACQUIS EXPERIMENTALEMENT (VERT) ET PREDIT PAR ANN (POINTS ROUGES), EN HAUT. DIFFERENCE ENTRE LES VALEURS CALCULEES ET EXPERIMENTALES, EN BAS. STATION A PERIODE DE POINTE 23-26 AOUT

3.1.3 Considérations sur les résultats obtenus et conclusions

Le modèle de trafic montre une très bonne 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 capable de fournir des valeurs correctes pour les niveaux de bruit uniquement 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 $L_{eq,A}$ qui correspondaient aux valeurs mesurées expérimentalement, aussi bien lorsque le signal acquis était quasi-stationnaire que dans des conditions de grande variabilité. L'erreur absolue est toujours bien inférieure à la valeur de 1 décibel pour toute la "ligne du 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, il est possible de résumer les résultats suivants :

Période douce (Figure VI.14) :

- *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 test-génération* : l'écart entre les données expérimentales et les valeurs simulées est toujours inférieur à un demi-décibel.

Période de pointe (Figure VI.15) :

- *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 adaptés 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. Ce phénomène était prévisible et peut être raisonnablement expliqué par une augmentation significative de l'activité anthropique pendant la période de pointe du mois d'août, où le bruit de la circulation des véhicules est inévitablement superposé par les effets d'autres sources de bruit, en particulier le soir lorsque la dégradation des performances est observée.

3.2 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE TRAFIC À L'AIDE D'UN LOGICIEL SUMO

Dans ce paragraphe nous définissons le processus méthodologique et les résultats obtenus de la réalisation 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 concernait :

- l'analyse des flux de mobilité actuels par l'étude de tronçons de route et d'intersections ;

- la construction du modèle de simulation de trafic sur la base des données de l'enquête sur l'état actuel pendant les périodes de pointe et les périodes creuses de 2019.

3.2.1 Enquêtes sur la circulation des véhicules

Pour l'analyse des flux de véhicules dans la zone en question, 15 sections d'enquête et 8 intersections ont été installées, dont la position est indiquée dans le tableau ci-dessous. Figure VI.16.

Tableau VI.2 fournit des détails sur l'emplacement des sites d'enquête.

| Identifiant | Localisation |
|-------------|---|
| Sec. 1 | Via Banchina Isola Bianca_direction Olbia centre |
| Sec. 1' | Via Banchina Isola Bianca_direction Porto |
| Sec. 2 | Avenue White Island |
| Sec. 3 | SS 125 |
| Sec. 4 | Périphérique d'Olbia 3 |
| Sec. 5 | SS 131 DCN Accès sud - Direction nord |
| Sec. 5' | SS 131 Accès DCN en direction du sud |
| Sec. 6 | SS 597 Logudoro |
| Sec. 7 | SS 127 Settentrionale Sarda |
| Sec. 8 | Circonvallazione 1 Olbia |
| Sec. 9 | SS 125 Entrée nord |
| Sec. 10 | Avenue Prince Umberto |
| Sec. 11 | Via. Poltu Ezzu |
| Sec. 12 | E840 accès Olbia |
| Art. 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-S 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 |

TABLEAU VI.2 EMPLACEMENT DES SECTIONS - PRINCIPALES INTERSECTIONS

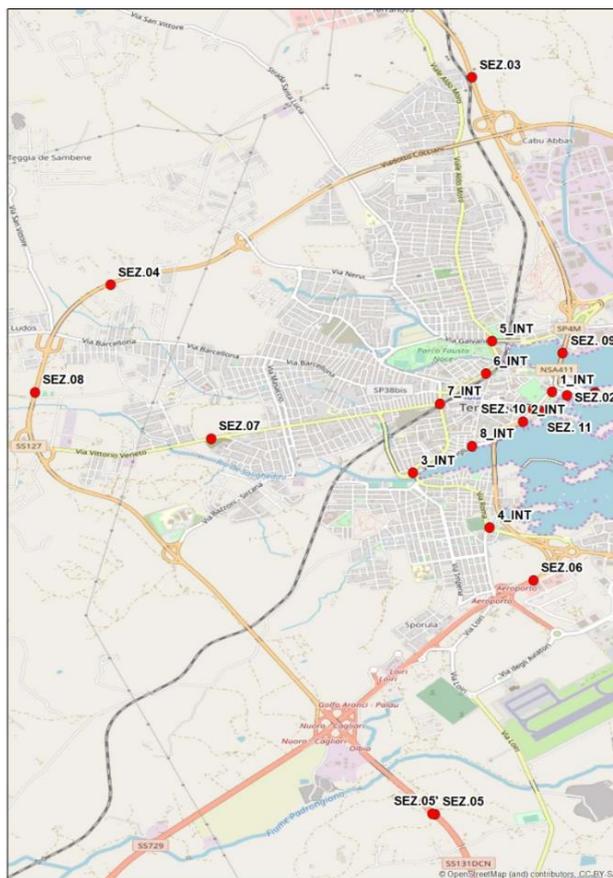


FIGURE VI.16 - LOCALISATION DES SECTIONS D'ENQUETE

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 effectuée en divisant les véhicules en trois catégories :

- les véhicules légers ;
- camions ;
- les motos.

Dans la documentation étendue du projet, les données sont stockées

3.2.1.1 *Enquêtes sur les sections*

Pendant la période d'automne, 181 411 véhicules/jour ont été contrôlés, soit 29 % de moins que pendant la période d'été (258 725 véhicules/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 traversant 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%. Figure VI.17 montre graphiquement la comparaison entre les deux périodes d'analyse.

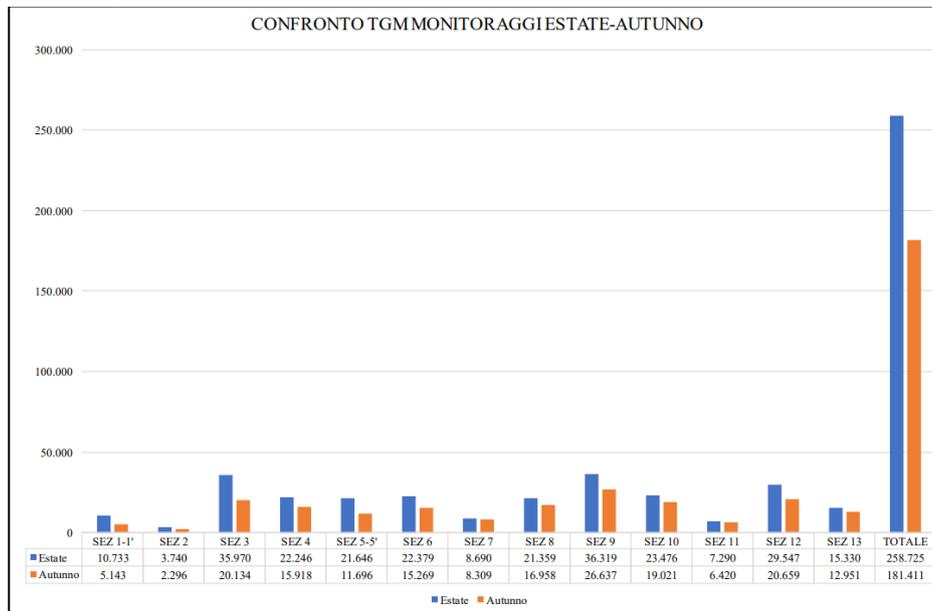


FIGURE VI.17 - COMPARAISON ETE-AUTOMNE DES 13 SECTIONS DE SURVEILLANCE

Les deux périodes de référence présentent des tendances similaires, avec deux pics correspondant aux heures de pointe. Alors qu'en période estivale, l'heure de pointe du matin se situe entre 9h00 et 10h00 avec 17 452 vei/h, en période automnale, elle se situe entre 8h00 et 9h00 avec 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 contrôle de la circulation aux huit intersections examinées a été effectué à deux moments différents de la journée :

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

Dans la période du matin, il y avait 18 309 véhicules en été et 18 859 en automne, soit une différence de 3%. En soirée, 19 980 véhicules sont passés en été et 20 809 en 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/Destination a été élaborée². 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, en utilisant le package Marouter, qui effectue une **affectation à l'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 Résultats du modèle à l'équilibre

Pour l'analyse des résultats obtenus à partir de l'affectation à l'équilibre, la valeur de la vitesse horaire moyenne de 10 km/h a été fixée comme seuil d'identification des conditions de congestion. Les flux de trafic exprimés en véhicules/heure aux heures de pointe du matin et du soir se rapportant à la période estivale et hivernale ont ensuite été obtenus.

Figure VI.18 montre les arcs affectés par la congestion, en les différenciant en fonction de la période pendant laquelle la congestion se produit. Tableau VI.3 d'autre part, fournit des données de niveau macro sur les simulations effectuées indiquant le pourcentage des arcs où la limite de capacité est dépassée entraînant une congestion et la valeur moyenne du rapport débit/capacité (*saturation*) de ces arcs.

²Élaboration basée sur les données de la matrice O/D de l'ISTAT 2011

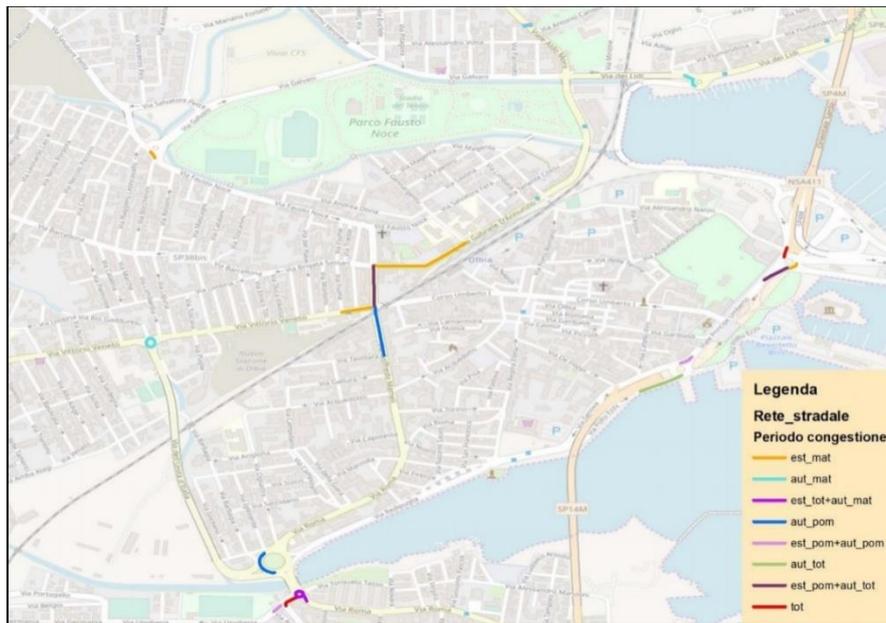


FIGURE VI.18 - ARCHES CONGESTIONNÉES

| 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% |

TABLEAU VI.3 - MACRO CARACTERISTIQUES DES SIMULATIONS

3.2.4 Les résultats du modèle dynamique

L'allocation 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 :

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

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

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 lié à l'indice DIFFP, qui pondère toute déviation sur la quantité de flux passant effectivement par l'arc, indique que les deux modèles (d'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 grâce à la modélisation de l'état actuel à l'aide du logiciel SUMO et représentés dans le tableau de bord. Figure VI.19.

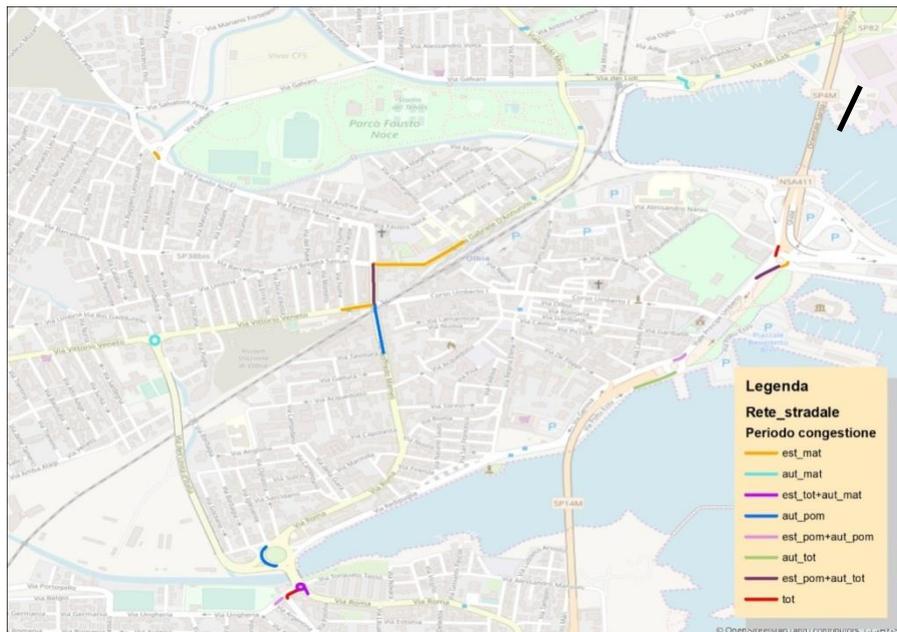


FIGURE VI.19 - LES ZONES LES PLUS ENCOMBRES

Cette figure montre que la plus grande congestion se produit sur le réseau routier interne et sur la route d'accès au port par le sud (voir encadré noir sur la figure).

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

En utilisant les sections 05 et 03 comme référence, on a vérifié la quantité et le type de flux d'accès/sortie à double sens provenant de l'arrière-pays sud et du nord d'Olbia.

| Section | Type de trafic | Période | | | |
|---------|----------------|-----------|-------------|---------------|-----------------|
| | | Été : 8-9 | Été : 18-19 | Automne : 8-9 | Automne : 18-19 |
| 05 | Léger | 1.488 | 1.703 | 814 | 855 |
| | Lourd | 73 | 61 | 78 | 45 |
| | Vélos | 15 | 20 | 0 | 3 |
| 03 | Léger | 1.988 | 2.429 | 1.235 | 1.667 |
| | Lourd | 71 | 31 | 65 | 17 |
| | Vélos | 17 | 33 | 8 | 7 |

TABEAU VI.4 - FLUX DETECTES DANS LES DEUX SECTIONS D'ACCES/DE SORTIE LES PLUS SIGNIFICATIVES DE LA ZONE URBAINE D'OLBIA.

L'analyse des flux de l Tableu VI.4 Il en ressort 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, puisque les flux en provenance du nord ne voient la confluence que d'un minimum de transits de Viale Italia/SP82 alors que les flux en provenance du sud voient la confluence des flux de Sassari et, sur la route du port, des flux de la zone sud provenant de la SS125.

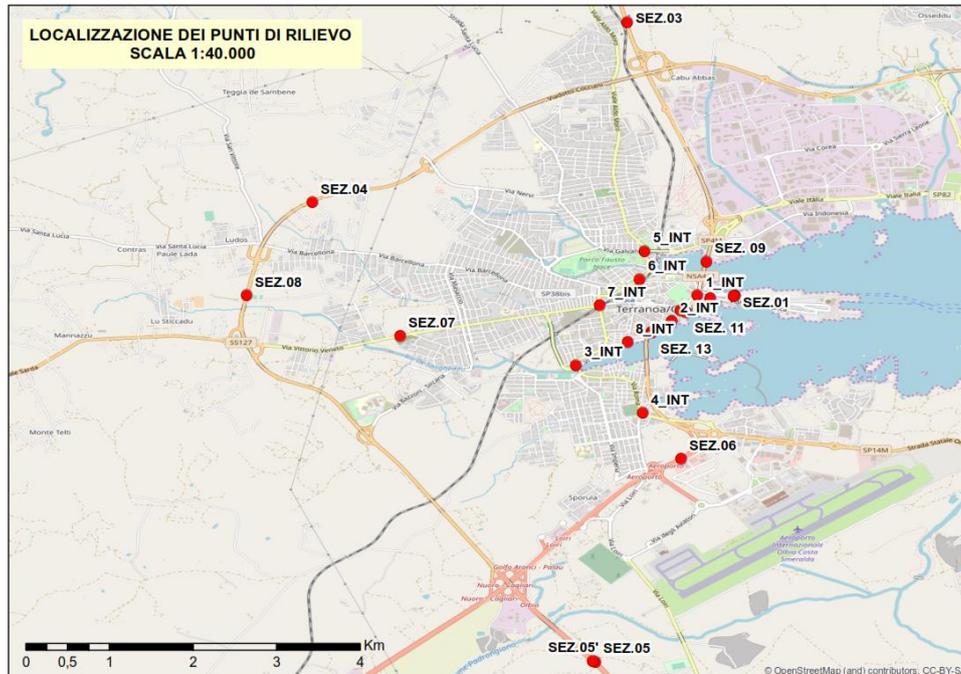


FIGURE VI.20 PUNTS DE CONTROLLE DU TRAFIC SUR LE RESEAU ROUTIER DE BASE D'OLBIA

Afin d'évaluer l'ampleur des **niveaux de congestion** sur le réseau routier, les résultats produits par le modèle de simulation du trafic pendant la période été/automne ont été analysés pour déterminer l'ampleur 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 assigné par calibrage en certains points du réseau routier, illustrés dans les graphiques suivants et en Figure VI.22 après et dans Tableau VI.5 (élaboré selon le processus développé dans 3.2.2).

| Section | Période de simulation | | | |
|---------|-----------------------|-------------|---------------|-----------------|
| | Été : 8-9 | Été : 18-19 | Automne : 8-9 | Automne : 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 |

TABLEAU VI.5 - DEBITS SIMULES AUX PUNTS INDICES DANS LA FIGURE . VI21



FIGURE VI.22 - POINTS DE CONTROLE DE LA CONGESTION ROUTIERE

Comme on peut le voir dans le Tableau VI.5 Comme on peut le voir dans la section précédente, le plus grand nombre de flux d'accès au port se produit 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 la congestion aux entrées de la ville d'Olbia et du port devraient viser les composantes lourdes du trafic automobile, qui sont les plus responsables de la congestion urbaine, afin de décongestionner le nœud 3 qui, aux heures de pointe, présente des criticités particulières.

3.2.6 Incidents

Les données d'accidents pour les années 2014-2018 ont été analysées, en comparant les voies d'accès du nord et du sud au port sur les différents itinéraires, et on constate que les flux en provenance du sud impliquent un plus grand nombre d'accidents, notamment sur la section côtière de la SS125.

Cet élément supplémentaire permet de certifier que l'installation d'un PMV redirigeant les flux de véhicules arrivant au Port ou en repartant depuis la direction sud est appropriée.

3.3 CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS DE TRAFIC 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 *PMVs actuellement présents dans la municipalité*

Il existe actuellement deux PMV, tous deux hors service, le premier situé sur le côté droit du quai de l'Isola Bianca, à la sortie du port (cf. Figure VI.23) et le second près du rond-point à l'intersection de la SS125, Via Mestre et Via dei Mercanti (voir. Figure VI.24). Si le premier est très utile et indispensable pour informer les flux qui quittent le Port, le second est important car il informe ceux qui arrivent au Port depuis la zone sud, par la route côtière.

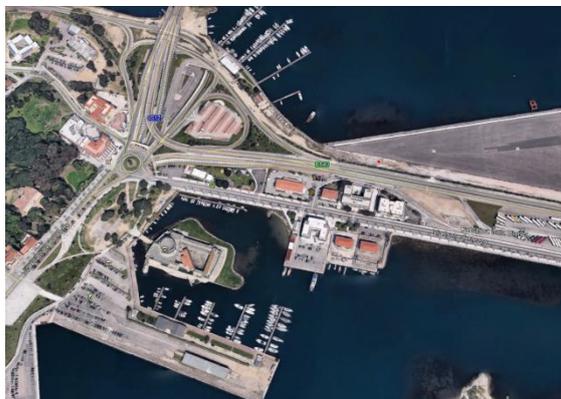


FIGURE VI.23 - LE PMV EXISTANT PRES DE LA PORT - EMBLEMMENT GÉNÉRAL



FIGURE VI.24 - LE PMV EXISTANT DANS L'ACCES ZONE COTIERE SUD DU PORT - SITUATION GENERALE

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 est conseillé 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 le e Figure VI.26. Avec ces PMV, il est prévu de fournir des informations d'info-mobilité pour les flux de véhicules provenant de Sassari, via la SS729 (PMV n.1) et les flux provenant du sud de la SS 131 dcn (PMV n. 2).

Les figures suivantes montrent les emplacements des deux PMV dans le réseau routier d'accès à Olbia.

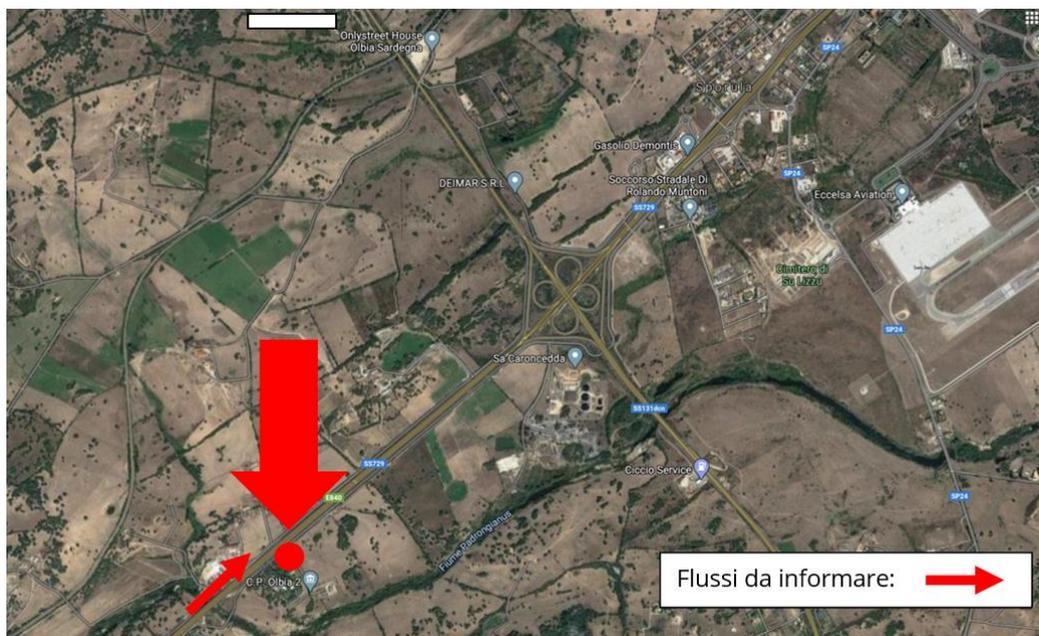


FIGURE VI.25 - LE NOUVEAU PMV NO.1 - EMPLACEMENT GENERAL

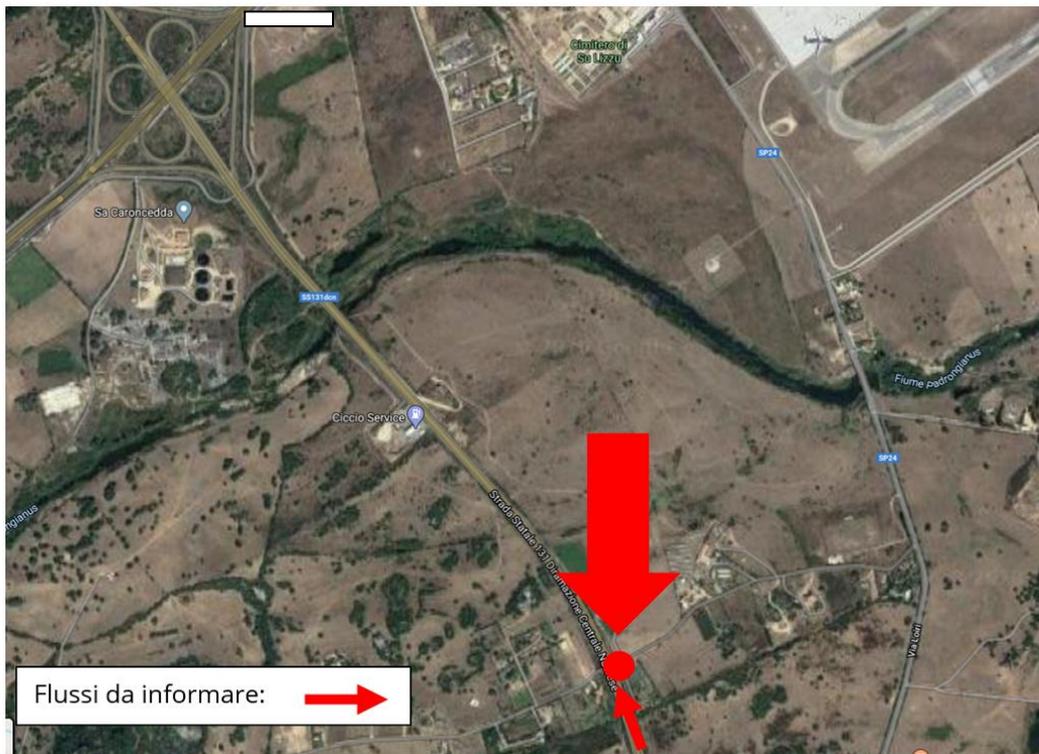


FIGURE VI.26 - LE NOUVEAU PMV N°2 - SITUATION GENERALE

3.3.2 SCÉNARIOS DE GESTION DU TRAFIC

Avec la définition de l'emplacement de la position des PMV, la méthode de gestion et d'identification des scénarios de rationalisation du trafic à travers la plateforme ITS pour la gestion de la messagerie avec les PMV est illustrée ci-dessous. Le système devra indiquer, en fonction des événements programmés (concomitance de plusieurs embarquements/débarquements simultanés de navires, entretien et interventions sur le réseau routier, etc.), ou des événements soudains (accidents sur le réseau routier menant au port, congestion temporaire des routes, etc.)

Les messages d'information sur la mobilité véhiculés par les PMV peuvent être intégrés à d'autres outils d'information des utilisateurs, tels que des APP 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 de réacheminement des véhicules au moyen de messages à envoyer par les PMV. Plus précisément, ces messages peuvent concerner le réacheminement des véhicules selon les types suivants :

3.3.2.1 ***TYPE 1 - MESSAGE D'ENCOMBREMENT***

Message informant des files d'attente à l'accès au port le long de la route SS125 côté sud, et suggérant d'accéder au port par une autre route (par exemple à partir de la

jonction nord de la SS125).

3.3.2.2 TYPE 2 - MESSAGE SUR LE RETARD D'UN NAVIRE

Message d'information sur les retards dans l'arrivée des navires au port, indiquant 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.

3.3.2.3 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 les forces de l'ordre.

3.3.2.4 TYPE 4 - MESSAGE D'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 SS 125 le long du front de mer du port de la ville d'Olbia, avec 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 DÉBIT

La détection des flux de trafic est l'un des éléments fondamentaux du système d'info-mobilité ITS : en effet, grâce à une surveillance continue, il sera possible, dès que des conditions critiques seront détectées (flux de véhicules élevés et donc émissions sonores importantes), d'envoyer des messages via les PMV pour avertir les utilisateurs et réorienter 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 de la SS125.

Les emplacements, avec leurs caractéristiques et leurs coordonnées, sont indiqués

dans le tableau ci-dessous. Tableau VI.6 tandis que les figures suivantes montrent l'emplacement des différents capteurs.

| ID | Via | Localisation | Coordonnées | |
|---------|-----------------------|--|-------------|----------|
| | | | N | E |
| SP no.1 | Quai de l'île Blanche | En ligne avec le parking et sur la rampe de sortie | 40,924755 | 9,509126 |
| SP n° 2 | Île blanche | Près du parking de l'Isola Bianca | 40,924554 | 9,507624 |
| SP n° 3 | S.P. 4M | Avant l'accès au métro, dans la direction nord | 40,921120 | 9,502346 |
| SP n° 4 | S.P. 14M | Sortie du temple | 40,931265 | 9,508584 |

TABLEAU VI.6 EMBLACEMENT DES DETECTEURS DE TRAFIC

Les éléments suivants Figure VI.27 montre l'emplacement de toutes les infrastructures planifiées du système d'info-mobilité basé sur le PMV.

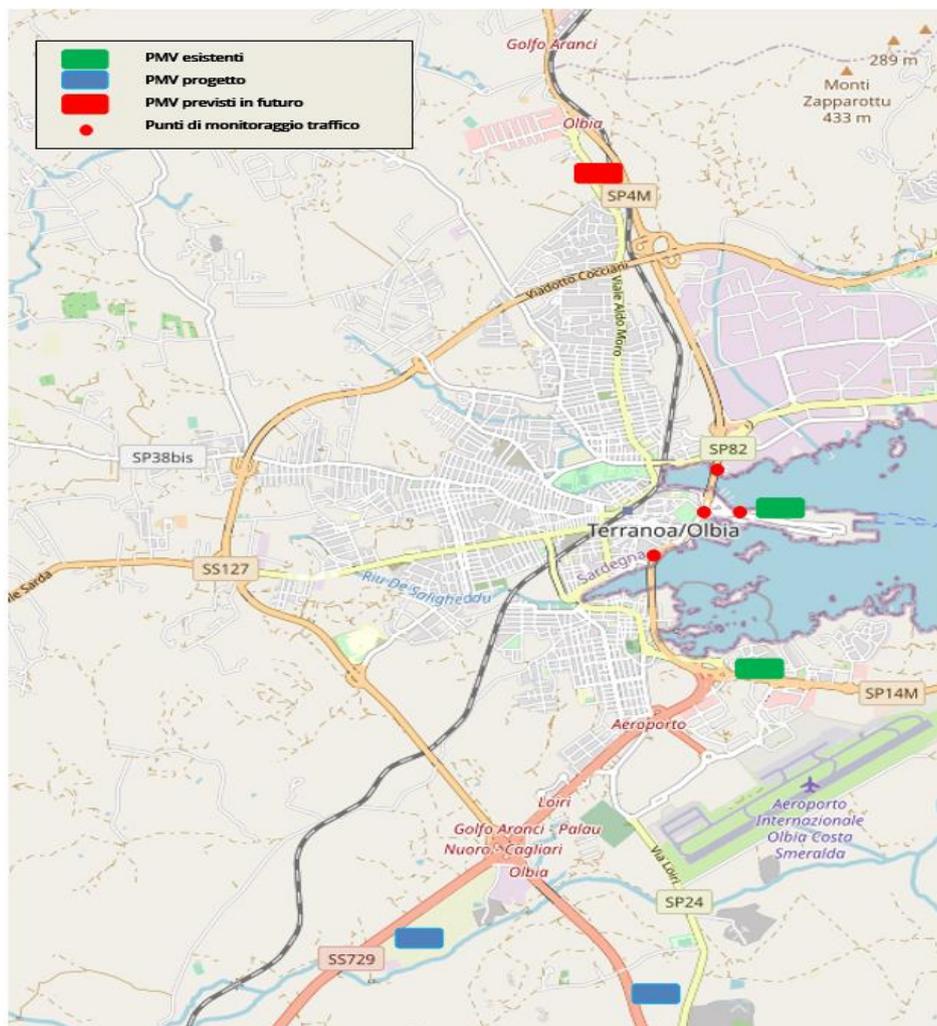


FIGURE VI.27 - PLAN D'IMPLANTATION DES INFRASTRUCTURES D'ARPENTAGE ET D'INFO-MOBILITE

3.4 APPLICATION DE LA MODÉLISATION PRÉDICTIVE PAR RÉSEAUX NEURONAUX À DES 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 d'une 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 de véhicules affectent la réduction du bruit urbain dans des zones spécifiques 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 $L_{eqA, 1}$) lorsqu'il reçoit en entrée des scénarios de trafic sélectionnés de manière appropriée et générés numériquement.

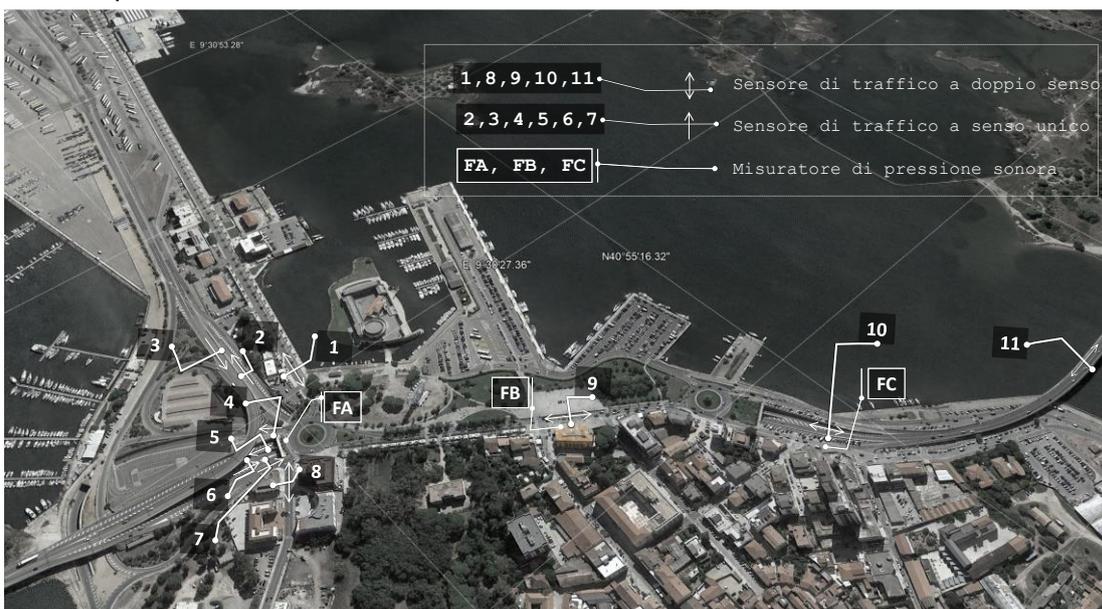


FIGURE VI.28: LOCALISATION DES SONOMETRES ET DES CAPTEURS DE TRAFIC DANS LA ZONE URBAINE DU FRONT DE MER DE LA VILLE PORTUAIRE D'OLBIA PENDANT LES CAMPAGNES EXPERIMENTALES DE 2019.

Le développement de cette étude est basé sur la capacité de généralisation du modèle afin de déterminer quelles valeurs équivalentes de pression acoustique L_{eqA} seraient établies aux points de mesure phonométriques (FA, FB et FC en Figure VI.28) 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 du mois d'août et de la période douce du mois 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 saisies 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 même, les valeurs de sortie déterminées par le modèle ANN sont censées se référer aux mêmes points que les contreparties expérimentales (comme mentionné dans l'avant-propos).

C'est pourquoi nous détaillons la méthode utilisée pour le traitement.

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

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 requises pour le fonctionnement 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) a été dérivée pour chacune des valeurs des sections, des sens de circulation et des classes de véhicules.

Les valeurs de débit générées par SUMO ont ensuite été distribuées selon la distribution normalisée pour l'heure de la journée considérée, en suivant les directives du HCM de 1985 pour les coefficients d'équivalence. Sur Tableau VI.7 est un exemple d'un ensemble de données numériques sur le trafic 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 | Absolus de la simulation SUMO | | | | | Tot |
|-------------------------------------|-----------|---------------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| | | | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 5 | |
| 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 SORTIE DU PORT | dir 1 | 1227 | 17.69712 | 147.476 | 740.3293 | 224.1635 | 60.83383 | 1190.5 |
| 1D DIRECTION DU PORT PORT | 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 NORTH DIREZ. NORTH | dir 1 | 664.7 | 64.78558 | 211.201 | 325.2236 | 34.98421 | 17.81603 | 654.0104 |
| 2A DIRECTION. SUD | dir2 | 502.05 | 16.3712 | 158.2549 | 233.2895 | 66.84905 | 17.05333 | 491.818 |
| 3A (EN DIRECTION DU SUD UNIQUEMENT) | | 405.45 | 23.85 | 220.6125 | 146.0813 | 1.490625 | 8.384766 | 400.4191 |
| 3B DIR. NORTH | 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. NORTH | dir2 | 780.6 | 42.43464 | 665.1383 | 60.19798 | 5.921113 | 4.317478 | 778.0095 |

TABEAU VI.7 COMPOSITION HORAIRES DU TRAFIC AUTOMOBILE DE 11 HEURES A 12 HEURES DONNEES RECAPITULATIVES AVEC UNE DISTRIBUTION EQUIVALENTE A CELLE EXPERIMENTALE MESUREE DE 11 HEURES A 12 HEURES 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 décrite. Toutefois, les simples valeurs instantanées générées par SUMO pour les différents scénarios analysés ne sont pas complètes pour garantir le bon fonctionnement du modèle, qui prévoit également la possibilité de prédire la sortie en fonction d'un certain nombre de régresseurs de trafic et de bruit (c'est-à-dire un certain nombre de valeurs de trafic et de bruit antérieures à l'instant courant). 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 L_{eqA}).

Nous fournissons dans le Figure VI.29 un exemple d'un ensemble de données comprenant des termes dynamiques, transitoires et stationnaires. 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 centre la phase transitoire en pointillés.

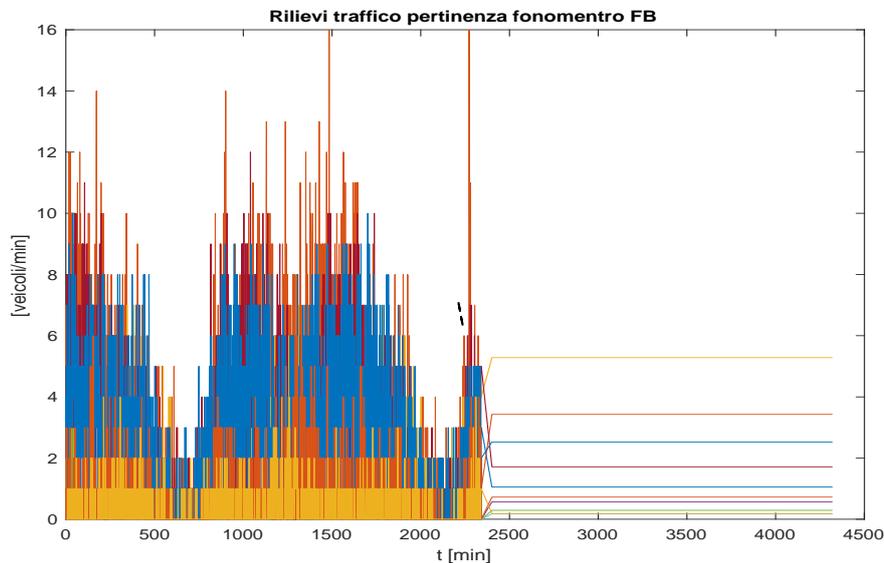


FIGURE VI.29 EXEMPLE D'UN ENSEMBLE DE DONNEES SYNTHETIQUES, AVEC DES TERMES DYNAMIQUES, TRANSITOIRES ET STATIONNAIRES. CHAQUE COULEUR REPRESENTE UNE CLASSE DE VEHICULES ET UN SENS DE CIRCULATION.

Il convient de noter que les données *historiques correspondent* à 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 plus robustes. Un jeu de données similaire avec les sections de route concernées a été construit pour chaque station de sonomètre.

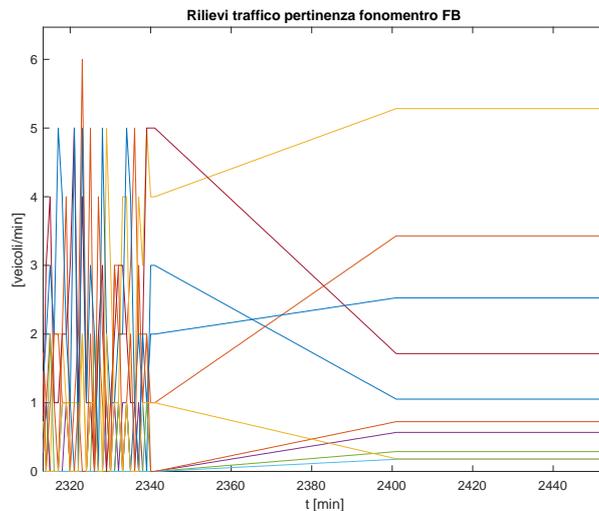


FIGURE VI.30 DETAIL SUR LE TRANSITOIRE DE FIGURE VI.29. CHAQUE COULEUR REPRESENTE UNE CLASSE DE VEHICULE ET UN SENS DE CIRCULATION.

3.4.2 RÉSULTATS

Les scénarios utilisés pour les simulations sont décrits ci-dessous. A la fin du paragraphe, un résumé des estimations obtenues pour chaque station de bruit et chaque scénario est fourni. 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 au traitement étendu joint au rapport de projet.

3.4.2.1 Scénario 1

Ce scénario se rapporte à la situation actuelle de la période de pointe de 11 à 12 heures 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.

3.4.2.2 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.

La situation est simulée si les flux de circulation devaient être déviés de manière appropriée à l'aide de panneaux à messages variables et d'applications. Les valeurs de débit de circulation et de bruit sont différentes de celles du scénario 1. On constate que les valeurs de L_{eqA} sont en général inférieures à celles du scénario 1, ce qui indique qu'une intervention de ce type présente sans aucun doute des avantages en termes d'atténuation du bruit de la circulation.

3.4.2.3 Scénario 3

Ce scénario, comme le scénario 1, est lié à la situation actuelle mais se réfère à la tranche horaire de 8h à 9h 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 pendant la période de pointe de 8h00 à 9h00 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.

3.4.2.4 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 détournés de manière appropriée par l'utilisation de panneaux à messages variables et de PPA 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 peut noter que les valeurs L_{eqA} 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.

3.4.2.5 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 si les flux de trafic étaient convenablement déviés à l'aide de panneaux à messages variables et de PPA pour atténuer le bruit sur le front du port pendant la période de pointe 8h-9h. Les valeurs relatives au débit de véhicules et au bruit sont sensiblement différentes de celles du scénario 4. On

constate que les valeurs de L sont en eqA général 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 de la circulation.

| | 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 |

TABLEAU VI.8 APERÇU DES VALEURS PREDITES PAR LE MODELE ANN POUR CHAQUE SCENARIO.

3.4.2.6 Considérations et comparaisons des 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 L_{eqA} seraient établies dans les points d'observation considérés 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 trafic), les conditions limites (à considérer comme cause 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 Tableau VI.8 Comme on peut le voir dans le tableau VI.8, un effet significatif du détournement du trafic sur le bruit estimé peut être apprécié. 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 liés aux mêmes conditions limites et comparables entre eux. Si l'on considère la plage horaire de 11 à 12 (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 significative dans le point d'observation FD en raison de l'effet plus important sur les flux de véhicules générés par le réacheminement dans les routes proches de ce point de mesure acoustique.

De même, pour la période de pointe de 8 h à 9 h, on observe que, si l'on compare 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 une réorientation importante 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. SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION

Cette section présente les résultats obtenus lors du processus de validation du modèle de simulation dynamique trafic-bruit basé sur un algorithme d'apprentissage automatique 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 fronts de mer 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 large entrée de métro ont été prédits pendant deux périodes caractéristiques, au cours desquelles l'intensité du trafic a largement varié de la période douce à la période de pointe. Cette première enquête exploratoire a révélé une bonne performance prédictive du modèle puisque l'erreur de prédiction de $L_{eq,1'}$ est resté essentiellement confiné dans la plage ± 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 de corrélation croisée 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 et du bruit, on a considéré le contexte du front de mer d'une autre ville maritime (Cagliari), dont la configuration du réseau routier du front de mer est 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

Prédire les effets de différentes stratégies de circulation peut être très utile et décisif.

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 avec un raffinement temporel de 1 minute. $L_{eq,1'}$ avec un raffinement temporel d'une 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 de 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 identifier les stratégies de gestion du trafic qui pourraient être poursuivies 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 différents points du réseau routier urbain de Cagliari, 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 concerne les points Pa1, Pa2 et Pa3, indiqués en avec 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 15 juillet 2020.

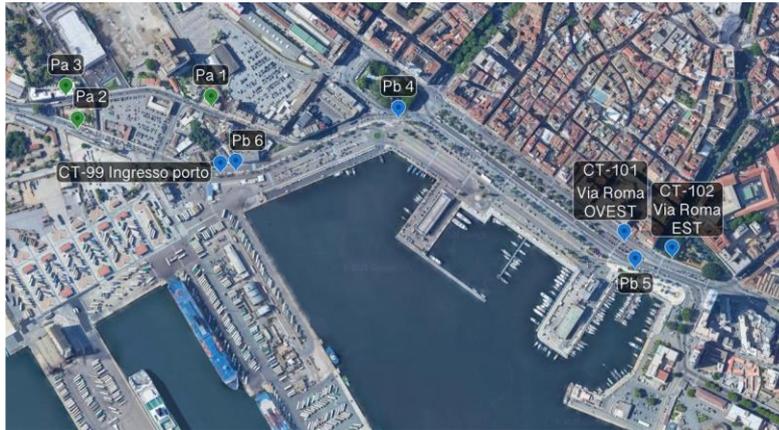


FIGURE VI.31 CARTE DES LIEUX DE MESURE. EN VERT LES POINTS DE LA PREMIERE SERIE, EN BLEU LES POINTS DE LA DEUXIEME SERIE DE SURVEILLANCE.

La deuxième période de surveillance concerne les points Pb4, Pb5 et Pb6, indiqués dans le tableau ci-dessous. avec 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 (cf. Figure VI.31) 3 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.

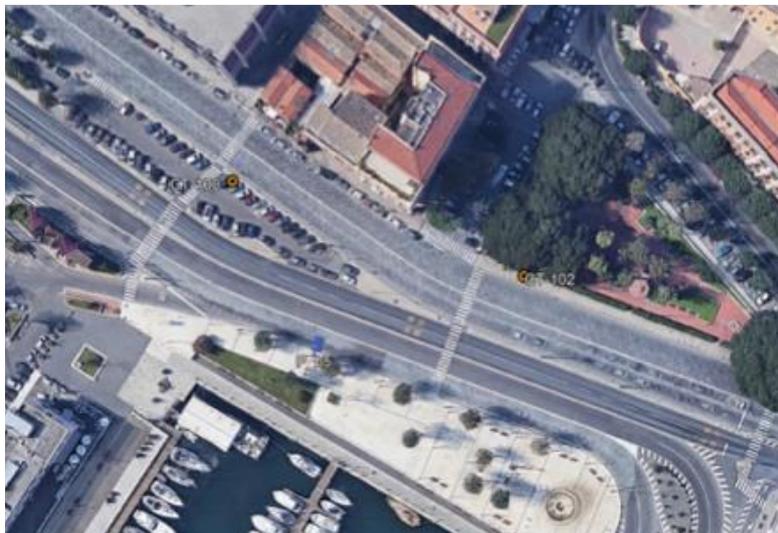


FIGURE VI.32 DETAIL DU POINT PB5 DU RAPPORT FOURNI PAR LE CONTRACTANT

Au point Pb6 (cf. Figure VI.31), outre le compteur de trafic destiné à la Via Ripa di Ponente, un autre compteur de trafic a été utilisé pour surveiller le trafic entrant dans le port (CT-99).

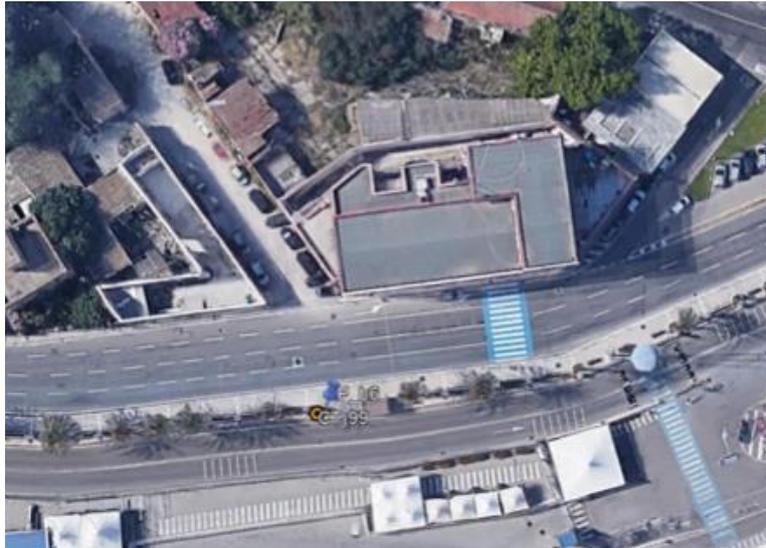


FIGURE VI.33 DETAIL DU POINT CT-99 DU RAPPORT FOURNI PAR L'ENTREPRENEUR

La durée totale utile 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 pré-filtrage 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 des liens du réseau neuronal, une partie a été réservée à la *validation*, c'est-à-dire à la vérification en cours de formation et enfin, une autre partie des données a été destinée à la phase de *test*. Il est clair que les enregistrements 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 des données de test, car il est nécessaire de réaliser les conditions pour effectuer une "validation aveugle" du modèle de prédiction.

Sur Figure VI.34, Figure VI.35 e Figure VI.36 les élaborations réalisées par le modèle sont présentées. Les panneaux supérieurs (4A, 5A et 6A) montrent les comparaisons entre le niveau de pression acoustique mesuré expérimentalement et le niveau de pression acoustique prévu par le modèle de simulation. $L_{eq,1h}(\tau)$ Dans les panneaux supérieurs (4A, 5A et 6A), des comparaisons sont faites entre le niveau de pression acoustique mesuré expérimentalement et le niveau de pression acoustique prévu par le modèle simulé. Les panneaux du bas (4B, 5B et 6B) montrent les tendances des erreurs de prédiction relatives entre les deux séquences.

On constate que les valeurs simulées et expérimentales des niveaux de pression acoustique sont rapportées sur une base horaire, 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 de bruit du trafic existants, il était nécessaire de conformer le fonctionnement du modèle d'apprentissage à la génération de données sur une base horaire.

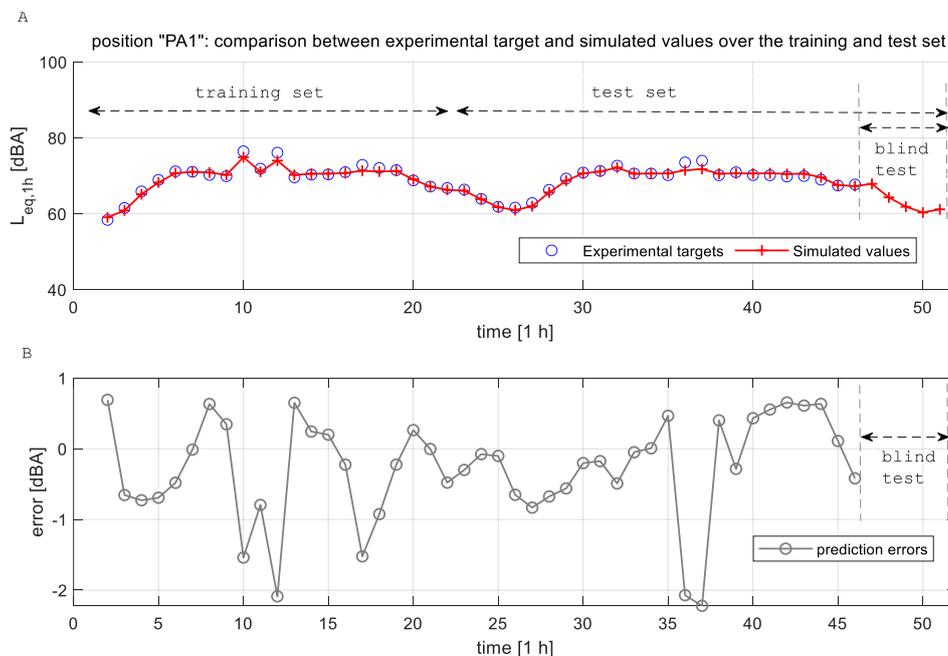


FIGURE VI.34 COMPARAISON DES TENDANCES DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{eq,1h}(\tau)$ AU POINT DE MESURE PA1. FIGURE 4B ÉVOLUTION DE L'ERREUR DE PREDICTION A PA1

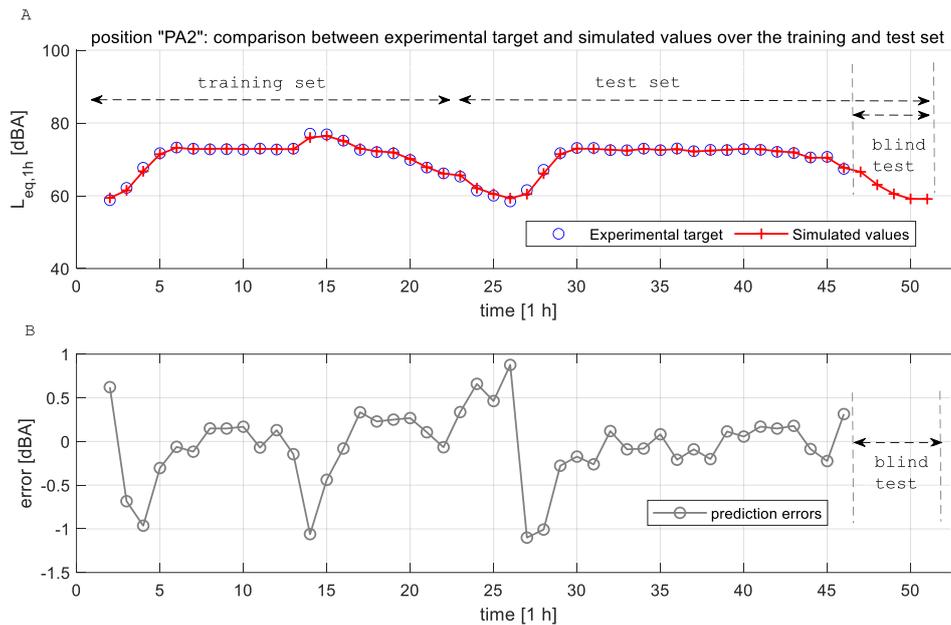


FIGURE VI.35 COMPARAISON DES TENDANCES DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{eq,1h}(\tau)$ AU POINT DE MESURE PA2. FIGURE 5B ÉVOLUTION DE L'ERREUR DE PREDICTION A PA2

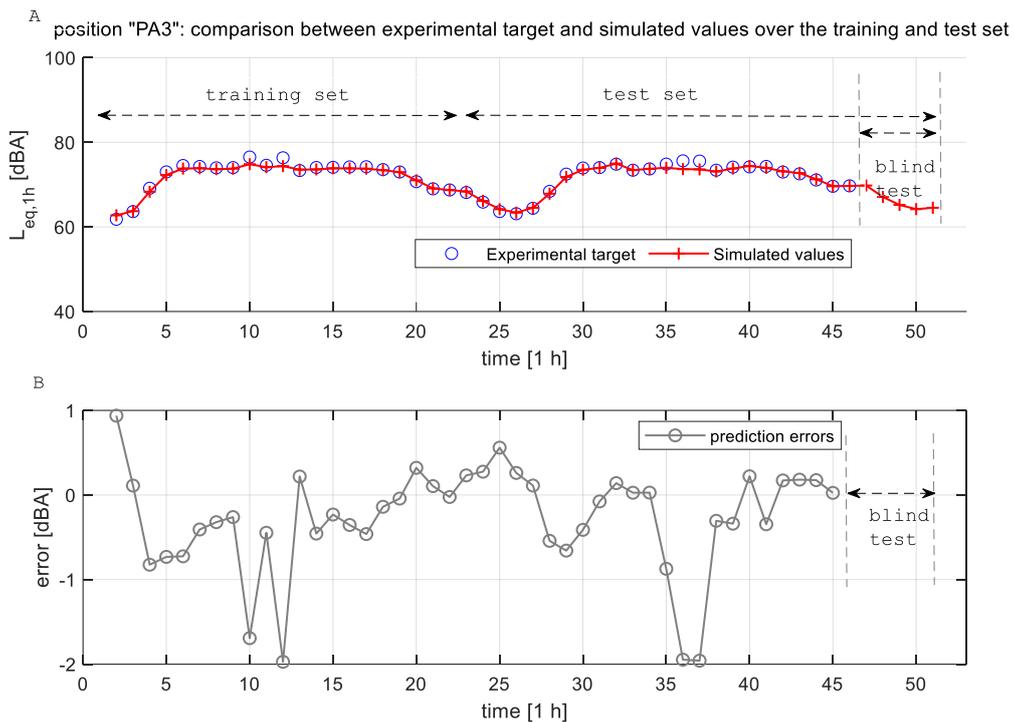


FIGURE VI.36 COMPARAISON DES TENDANCES DES VALEURS EXPERIMENTALES ET SIMULEES DE $L_{eq,1h}(\tau)$ AU POINT DE MESURE PA3. FIGURE 6B ÉVOLUTION DE L'ERREUR DE PRÉDICTION

5. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DES LIGNES DIRECTRICES - IDENTIFICATION DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE-

En partant 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, en 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 sonore** basée sur un modèle physique (statique) de propagation.
- un modèle d'analyse et de prévision 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 unifié axé sur l'application de ces modèles de prévision, certains aspects essentiels sont mis en évidence ci-dessous, en passant par les phases fondamentales des activités décrites dans cette section II.

La première étape est l'investigation cognitive de la réalité urbaine et de son sous-système portuaire dans lequel des actions d'atténuation du bruit doivent être entreprises. Chaque ville côtière caractérisée par la présence d'un port 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 bruit du trafic 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'enquête sur le flux de trafic et les stations d'enquête sur le bruit phonométrique, et de réorganiser les données d'entrée ainsi acquises selon un raffinement temporel approprié. 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. Bien que le modèle puisse être "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 méthode, valable pour le développement d'un modèle heuristique, diffère d'une approche plus conventionnelle, qui vise généralement à caractériser les arcs routiers avec des valeurs de paramètres de référence moyennées sur des intervalles et des périodes plus ou moins longues, et 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 front de mer 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 aux points de contrôle coïncidant avec les stations du relevé phonométrique a permis d'obtenir un retour positif sur l'application correcte du modèle de propagation physique.

Dans une procédure standardisée, les cartes de bruit 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 qui ne sont 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 envisagé 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'infomobilité. 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, fournissant des indications supplémentaires sur le potentiel, les limites du modèle et les méthodologies nécessaires à 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 contributions de contextes et de modes opératoires différents, peuvent constituer les grandes lignes d'une procédure commune, qui peut également être exportée vers d'autres situations, dans lesquelles 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 sur les méthodologies de suivi

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 par rapport à laquelle les actions de gestion et de régulation du débit doivent être entreprises. Dans ce sens, il faut d'abord identifier les quais pour les

navires de passagers et de marchandises et 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 encadré en termes de bilan des flux d'entrée/sortie, sachant qu'une analyse statistique n'est pas nécessaire pour la caractérisation des axes routiers, utile pour la planification de la mobilité et des infrastructures, mais plutôt pour 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 SURVEILLANCE.

La spécificité du trafic induit par la présence du port consiste en une extemporanéité et une variabilité marquées au sein de l'année civile, de la saison et même de la journée. 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 front de mer, 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 du port, en acquérant au préalable les données annuelles du trafic maritime. Outre les départs de navires et les postes d'amarrage, il faut tenir compte d'autres facteurs qui peuvent déterminer des augmentations ou des diminutions du trafic journalier moyen, également en fonction 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 des 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 par tranches horaires liées aux déplacements pour le travail, les écoles, etc.

5.1.3 L'IDENTIFICATION DES TRONÇONS DE ROUTE À SURVEILLER.

Idéalement, les sections de surveillance devraient renvoyer 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 ambiant de fond ou du bruit provenant d'autres sources. En pratique, cela peut être difficile à réaliser pour de nombreuses raisons, d'abord à cause de la conformation et/ou de l'extension excessive de la zone d'étude et ensuite à cause de l'insuffisance des ressources instrumentales pour effectuer les mesures.

Bien entendu, l'optimisation du choix des tronçons routiers nécessite une évaluation préalable minutieuse du réseau routier et des flux et, si nécessaire, une redéfinition de la zone de contrôle.

En général, le positionnement doit être orienté vers :

- pour 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 à un emplacement donné du sonomètre ;
- Définir des points de surveillance stratégiques 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 largement apparue 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 suite aux interventions de réacheminement est référée 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 labile et floue.

5.1.4 L'IDENTIFICATION DES STATIONS 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 du flux de trafic, de manière à corrélérer directement l'émission sonore avec le trafic de véhicules.

En général, la nature des sources acoustiques à proximité des points de mesure peut être très diverse : il peut s'agir de véhicules se déplaçant à une 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, voire à éliminer, leurs effets. 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 ambiant, qui doit être suffisamment faible pour ne pas masquer le signal émis par les sources du véhicule.

Les modèles prédictifs dynamiques ont toutefois 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 "frontière", 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 peuvent, si nécessaire, être vérifiés au moyen de mesures expérimentales sur des échantillons.

5.2 Correspondance entre les 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 relevés 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.

5.3 Type de mesures de réduction

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, en particulier pour les flux de véhicules qui ont pour origine et destination le port.

L'analyse des scénarios possibles de réorganisation 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 construire 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 d'études de flux, 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 indique les messages préparés en fonction d'événements programmés (concomitance de plusieurs embarquements/débarquements simultanés de navires, entretien 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 véhiculés par les PMV peuvent être intégrés à d'autres outils d'information des utilisateurs, tels que des APP 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.

5.4 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 d'embarquement et de 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 correspondants. 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 afin de vérifier sa fiabilité. On dispose donc d'une richesse d'observations et d'expériences qui permet d'exprimer des idées méthodologiques importantes.

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 congruent des données. En d'autres termes, les données doivent exprimer implicitement une relation de cause à effet.

La présence d'activités génératrices de bruit qui ne sont pas directement attribuables au trafic peut diminuer les performances du réseau neuronal car elle invalide cette relation. Ces contributions doivent être minimisées si 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 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 pu prédire des valeurs de $L_{eq,A}$ conformes aux valeurs mesurées expérimentalement, tant 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 associé doit se référer à un intervalle de temps suffisamment long pour pouvoir découper les intervalles nécessaires dans la chronologie des mesures pour la phase de formation, de test et de validation. Un intervalle de temps minimum de 72 heures peut être considéré, incluant la variabilité typique jour-nuit.

La méthode des réseaux neuronaux est en effet basée sur une phase préliminaire, appelée "procédure d'entraînement", selon laquelle le réseau est amené à adapter 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 étape de formation, 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 la cible 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 "*intervalle de temps unique*" 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 ensemble de formation sur un intervalle de 1 400 minutes et de 3 600 minutes pour la phase de test. Essentiellement, 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 maximums et les minimums soit déjà présent, et cela peut se produire plus le contrôle a saisi la gamme de variabilité des quantités examinées.**

Il est bien établi que ce n'est pas une bonne stratégie de tester la capacité de généralisation du réseau avec de nouvelles configurations d'entrée dont les données sont en dehors de la gamme des entrées avec lesquelles le réseau a été précédemment testé. Dans cette éventualité, qui doit être évitée, l'apprentissage pourrait être inefficace ou trop lent.

Cependant, l'ensemble des données expérimentales sur les flux de véhicules doit d'abord être normalisé avant d'être fourni au réseau. La normalisation est une bonne pratique pour 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. 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 de mesure 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 d'avoir une collecte de données aussi complète que possible afin que le réseau soit le plus performant en termes de précision et de *correspondance* avec les 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, la suppression est définitive et l'ensemble d'entraînement 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, précisément pour éliminer la probabilité qu'un tronçon routier donné soit exclu à tort parce qu'il s'est avéré peu corrélé ou redondant avec le climat acoustique 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 du 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 aplatissage des informations et une détérioration 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 tendance dynamique réelle 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.

SEZIONE VII. ANALYSE DES ÉMISSIONS SONORES DES ACTIVITÉS PORTUAIRES DE MANUTENTION DES MARCHANDISES ET DES PASSAGERS DANS L'HYPOTHÈSE DE NOUVEAUX TRANSPORTEURS ÉNERGÉTIQUES À PROPULSION

1. INTRODUCTION

Les activités menées par l'Université de Pise (Département d'ingénierie énergétique, systèmes, territoire et construction, en collaboration avec le Département de physique) concernaient l'analyse des émissions sonores des activités de manutention portuaire et le développement de modèles/scénarios des sources dans l'hypothèse de l'utilisation de nouveaux vecteurs énergétiques pour alimenter les systèmes de propulsion.

L'étude de cas examinée est celle de l'Area Terminal Darsena Toscana (TDT) du port de Livourne, où une campagne de mesure a été mise au point (en collaboration avec le département du développement et de l'innovation de l'autorité portuaire et avec le bureau du gestionnaire HQSE de la société TDT) concernant les principales activités bruyantes de la manutention des marchandises avec des véhicules routiers à moteur diesel (par exemple, reach-staker, transtainer et grues de quai). Les mesures acoustiques ont été répétées afin de caractériser les différentes conditions de travail (par exemple, la manipulation des conteneurs de chargement/déchargement, les manœuvres du véhicule, l'attente en stand-by) et les différentes conditions de contexte (par exemple, la présence de plusieurs sources, le travail simultané, le transit du véhicule).

Au total, 42 mesures acoustiques ont été effectuées, d'une durée de 3 à 30 minutes, pour un total de 600 minutes de mesures, comprenant plusieurs événements sonores d'intérêt, ainsi que des enregistrements audio/vidéo et un répertoire photographique.

Les activités de post-traitement ont été effectuées à différents niveaux de détail : étude de l'événement global ; étude des macro-événements à l'intérieur de l'événement global ; étude des événements significatifs pour chaque macro-événement ; étude du spectre d'émission sonore lié aux événements significatifs. La recherche s'est poursuivie avec la modélisation des sources sonores importantes et des scénarios possibles. Les émissions sonores de véhicules similaires à traction électrique ont été analysées et les sources respectives ont été modélisées. Ceci a permis d'estimer les niveaux sonores dans l'hypothèse d'un vecteur électrique pour

alimenter les systèmes de propulsion des véhicules 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 de mesures phonométriques des événements sonores enregistrés ; description de l'évolution temporelle et des spectres de fréquence des événements sonores enregistrés ; modélisation des événements les plus significatifs à l'aide d'un logiciel dédié ; modélisation de scénarios possibles envisageant la transition vers un vecteur électrique.

L'analyse réalisée permettra de définir les meilleures stratégies communes pour réduire la pollution sonore dans les ports, contribuant ainsi au développement durable des ports commerciaux et des plateformes logistiques.

2. RÉSUMÉ DU PRODUIT T 2.3.1

Le terminal Darsena Toscana (zone TDT) du port de Livourne est directement relié à la route à grande vitesse Florence-Pisa-Livourne et est situé au nord de la ville de Livourne (Figure VII.1). La zone a une surface totale de 389.000m² (longueur du quai 1.430m, profondeur sous le quai 13m), le terminal ferroviaire a une surface de 49.500m² (longueur de la voie 1.350m), le terminal frigorifique a une surface de 17.900m². Selon les données publiées pour l'année 2018, un total d'environ 37 millions de tonnes de marchandises ont été traitées.

La zone TDT est organisée comme suit (Figure VII.2 e Figure VII.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, voie ferrée, 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 du développement et de l'innovation) et la société TDT (HQSE Manager TDT Office). En particulier, les jours et horaires suivants ont été identifiés en accord avec le responsable HQSE TDT : jeudi 3 octobre 2019, vendredi 4 octobre 2019, mercredi 9 octobre 2019, vendredi 11 octobre 2019, toujours en journée dans la tranche horaire du matin de 7h30 à 13h30, pour un total de 24 heures.

Les mesures phonométriques concernaient des événements sonores liés à : des grues de quai (Figure III.3A), des reach stackers (Figure III.3B), des transtainers de ligne ferroviaire (Figure III.3C), des transtainers de cour principale (Figure III.3D), et des conteneurs réfrigérés (Figure III.3E). Les mesures acoustiques ont été répétées afin de caractériser les différentes conditions de travail (par exemple, la

manutention des conteneurs pendant les phases de chargement et de déchargement, les manœuvres des véhicules routiers, l'attente en stand-by, ...) et les différentes conditions de contexte (par exemple, la coexistence de plusieurs sources sonores, le traitement simultané, le passage de véhicules à proximité, ...), en fonction de la position dans la zone TDT (cour principale, quai, voie ferrée). Pour être complet, des mesures du bruit dans l'environnement ont été effectuées, notamment : dans la zone située devant les bureaux de TDT (Figure VII.4F), près de la porte des douanes (Figure VII.4G), dans la zone Pre-Gate près de la barrière automatique pour les véhicules entrants (Figure VII.4H).

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

2.2 Équipement utilisé et opérateurs

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



FIGURE VII.1 - ETUDE PHOTOGRAPHIQUE DE LA ZONE TDT, PORT DE LIVOURNE

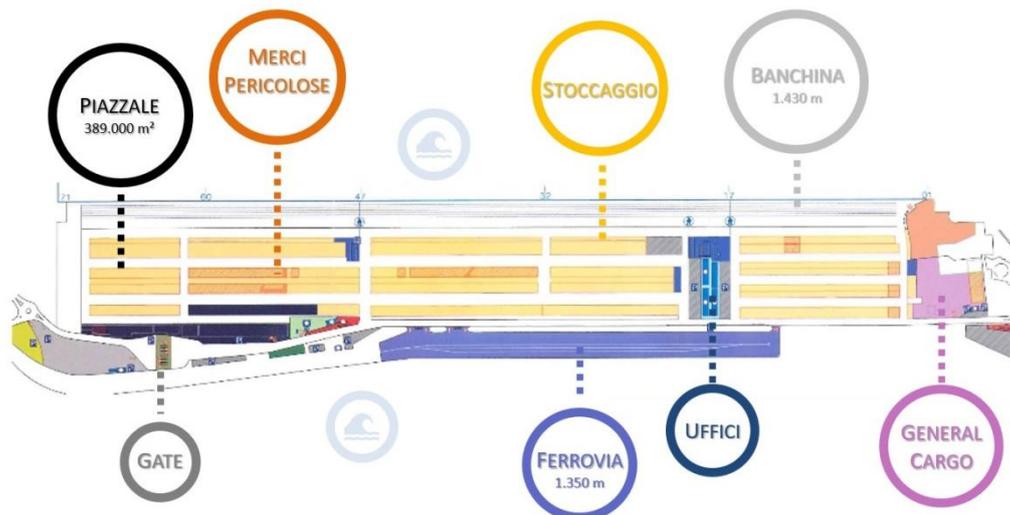
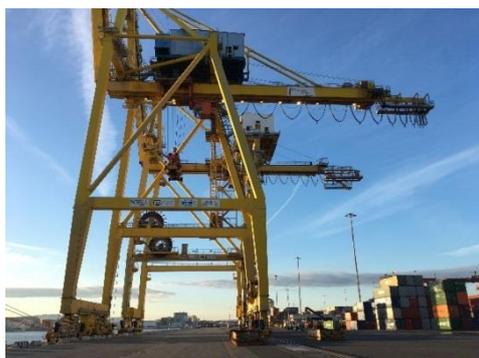


FIGURE VII.2 - PLAN SCHEMATIQUE DE LA ZONE TDT, PORT DE LIVOURNE.



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



(A)



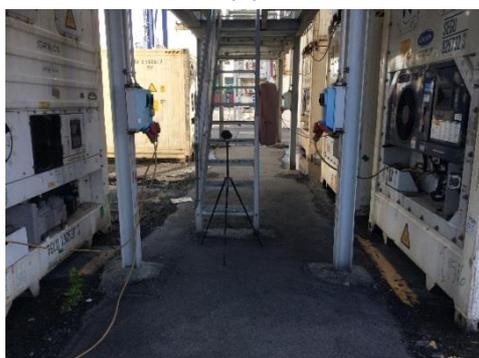
(B)



(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)

FIGURE VII.4 - PORT DE LIVOURNE, SOURCES DE BRUIT DANS LA ZONE TDT : (A) GRUE DE QUAÏ, (B) EMPILEUR A PORTEE, (C) TRANSTAINER, COTE CHEMIN DE FER, (D) TRANSTAINER, COTE COUR PRINCIPALE, (E) FRIGO A CONTENEURS. BRUIT AMBIANT : (F) BUREAUX DE LA DTT, (G) PORTE DES DOUANES, (H) ZONE PRE-PORTE.

2.3 Matériel capturé et post-traitement

Au total, 42 mesures phonométriques ont été effectuées, d'une durée variant de 3 à 30 minutes, pour un total de plus de 600 minutes de mesure, incluant plusieurs événements sonores d'intérêt (parfois séparés par l'évidence, parfois superposés par la simultanéité). Ces mesures ont été accompagnées de 37 enregistrements audio (à l'exclusion de certaines mesures du bruit ambiant) et de 30 enregistrements vidéo des événements qui se sont déroulés (à l'exclusion de certaines mesures du bruit ambiant), ainsi que de divers documents photographiques.

L'activité de post-traitement a été réalisée à quatre niveaux de détail (Figures III.5-III.8, montrant les opérations effectuées par un camion reach-steaker pour le stockage d'un conteneur) :

- l'étude de l'événement mondial,
- 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 indiquant 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 ;
- caractère alphabétique pour l'événement macro (dans l'exemple : A) ;
- des caractères numériques pour l'événement significatif (dans l'exemple : 10).

Sur Tableau VII.1 sont les acronymes utilisés pour les sources, le nombre de mesures effectuées et le nombre de fiches de mesure liées à l'activité de post-traitement. Notez que, dans le tableau, lorsque le nombre de "fiches de mesure" est inférieur au nombre de mesures, cela signifie que le post-traitement des mesures effectuées pour les essais et non considérées comme significatives en raison de leur courte durée ou du type d'événement enregistré a été omis.

| ID | Sources de bruit | | |
|----|------------------|-------------------|------------------|
| | Source : | Nombre de mesures | Nombre de cartes |
| GB | Grues de quai | 2 | 2 |
| RS | Gerbeur à bras | 7 | 6 |

| ID | Bruit dans l'environnement | | |
|----|----------------------------|-------------------|------------------|
| | Source : | Nombre de mesures | Nombre de cartes |
| RA | Bruit dans l'environnement | 4 | 4 |
| G | Porte des douanes | 1 | 1 |

| | | | |
|------------|--|----|----|
| TSf | Transtainer (côté rail) | 8 | 7 |
| TSp | Transtainer (côté tablier principal) | 14 | 12 |
| CF | Conteneur réfrigéré | 2 | 2 |

| | | | |
|-----------|----------|---|---|
| PG | Pré-Gate | 4 | 4 |
|-----------|----------|---|---|

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Total des mesures effectuées | 42 |
| Total des feuilles de mesure | 38 |

TABLEAU VII.1 ACRONYMES UTILISES, NOMBRE DE MESURES EFFECTUEES ET NOMBRE DE FICHES PAR SOURCE

Toutes les activités réalisées et les principaux résultats des activités de post-traitement des mesures effectuées (distinguées par type de source sonore et organisées en tableaux et graphiques pour une lecture immédiate) sont rapportés : dans le "**Document de synthèse**" concernant les "*Activités de mesure acoustique réalisées afin de caractériser l'émission sonore de certaines sources de bruit en action dans le port de Livourne pour la manutention des conteneurs*", dans les "**Fiches de mesure**" 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 fiche puisse être extraite séparément, Enfin, le "**Document de post-traitement**" décrit le post-traitement des mesures afin de schématiser les différents événements sonores observés in situ et de modéliser les sources sonores actives dans la zone d'étude pour une utilisation ultérieure des résultats obtenus dans un logiciel de modélisation acoustique environnementale.

Les documents mentionnés ci-dessus, rédigés en italien et en français, ont été placés en version pdf sur le portail en ligne du projet REPORT.

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

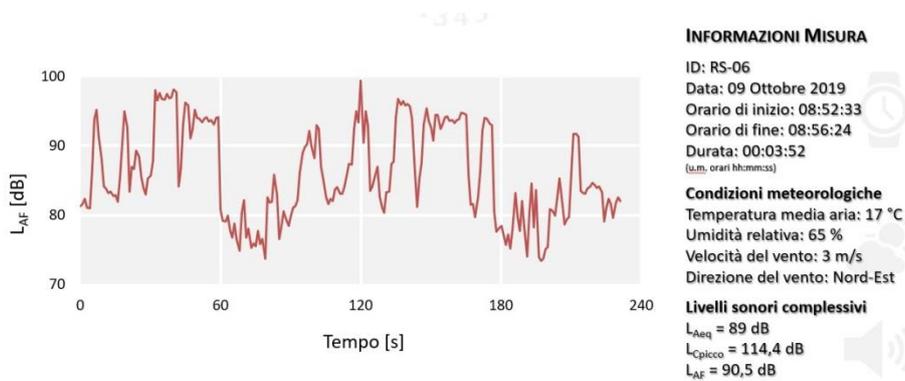


STEP 1

OSSERVAZIONE DELL'AZIONE SVOLTA DAL MEZZO

- Fase 1: Aggancio e sollevamento del container dall'automezzo
- Fase 2: Spostamento del mezzo
- Fase 3: Posizionamento container su pila

FIGURE VII.5 EXEMPLE DE PROCEDURE DE MESURE ET DE POST-TRAITEMENT (ETAPE 1)



STEP 2

ACQUISIZIONE DEL TIME HISTORY DELL'EVENTO

- Livello di pressione sonora ponderata «A» secondo la costante di tempo "fast", L_{Af} (dB)

FIGURE VII.6 EXEMPLE DE PROCEDURE DE MESURE ET DE POST-TRAITEMENT (ETAPE 2)



STEP 3

STUDIO DEGLI EVENTI SIGNIFICATIVI

- RS-06-A-03:** Reach stacker sotto sforzo durante il sollevamento del container (dist. sorgente-microfono 3 m).
- RS-06-A-04:** Reach stacker in movimento e sotto sforzo durante sollevamento container (dist. sorgente-microfono da 3 a 7 m).

FIGURE VII.7 EXEMPLE DE PROCEDURE DE MESURE ET DE POST-TRAITEMENT (ETAPE 3)

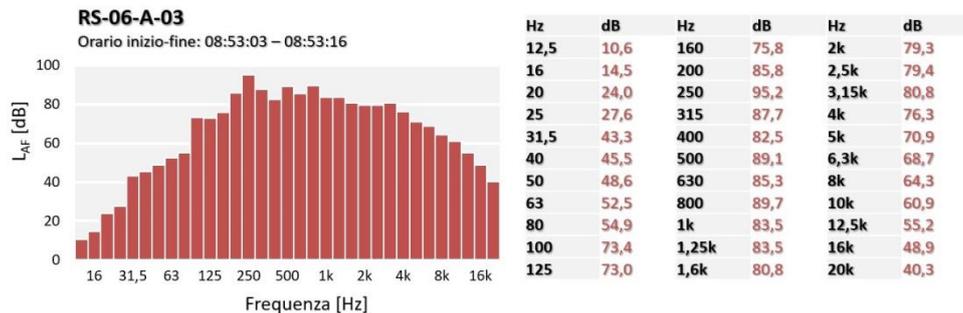


FIGURE VII.8 ESEMPIO DI PROCEDURA DI MISURA E DI POST-TRATTAMENTO (ETAPE 4)

Enfin, l'estimation des niveaux de puissance acoustique des sources sonores examinées a été effectuée de manière préliminaire en utilisant une version simplifiée de la formule de propagation du son dans un environnement extérieur, en négligeant les divers effets de l'atténuation du son dus aux facteurs environnementaux, dont certains peuvent être effectivement négligés. Les niveaux de puissance acoustique sont évidemment calculés à partir des niveaux de pression acoustique mesurés avec l'instrumentation phonométrique utilisée.

2.4 Modèles d'émissions sonores des nouveaux systèmes de propulsion

A partir des mesures acoustiques effectuées dans la zone du Terminal Darsena Toscana du Port de Livourne, les niveaux de puissance sonore ont été calculés, par bandes de tiers d'octave. Un total de 362 spectres sonores relatifs aux niveaux de puissance sonore, par bandes de tiers d'octave, dans la gamme de fréquences 12,5 Hz ÷ 20 kHz, représentatifs des nombreux événements sonores identifiés, ont ensuite été traités et une archive interactive a été préparée sous forme de fichier Excel (accompagnée d'un bref guide de consultation de l'archive). Enfin, un modèle numérique de la zone terminale de Darsena Toscana a été préparé à l'aide du logiciel "iNoise" version 2021, qui met en œuvre le modèle de calcul ISO 9613 en bandes de tiers d'octave.

En ce qui concerne la morphologie de la Darsena Toscana, les fichiers de forme géoréférencés relatifs aux terrains et aux bâtiments, disponibles par le biais du service cartothèque SITA de la Région Toscane, ont été implémentés dans le modèle ; les bâtiments ont été affectés à la hauteur correspondante indiquée dans les fichiers de la Région Toscane, et des coefficients de réflexion acoustique de référence ont été affectés aux bâtiments et aux terrains. Les sources ont été modélisées comme des sources mobiles et un chemin a été défini pour chacune

d'entre elles sur la base des photographies satellites et sur la base des photographies et des vidéos prises pendant les activités de mesure. Selon le D.lgs. 194/2005, qui met en œuvre la directive européenne 49/2002, le paramètre utilisé pour les simulations acoustiques est L_{DEN} .

Les résultats complets de l'**analyse logicielle**, élaborés en italien et en français, ont été insérés en version pdf sur le portail en ligne du projet REPORT. En particulier, la modélisation des événements sonores significatifs identifiés lors des mesures a été effectuée d'abord de manière simplifiée avec le logiciel iNoise, logiciel open source DGMR (Figure III.9) et ensuite avec le logiciel SoundPlan.



FIGURE VII.9 EXEMPLE DE MODELISATION AVEC LE LOGICIEL INOISE

2.5 Estimations de la réduction du bruit des activités portuaires dans des scénarios avec différents degrés de pénétration des nouveaux dispositifs

Lors de la validation avec le logiciel SoundPlan, les activités qui peuvent être électrifiées et non électrifiées ont été identifiées pour chaque véhicule de manutention (machine d'exploitation). Cela a été utile pour pouvoir attribuer différents "groupes" au modèle et ensuite schématiser différents scénarios. Notez que la hauteur de la source est un facteur qui ne doit pas être négligé. Le regroupement du cycle de fonctionnement en une seule source sous-estimerait l'émission des sources situées à des hauteurs différentes. Le tableau montre un exemple des principales sources de bruit : GB (gra depuis le quai), RS (reach-staker),

TSP (transtainer du côté du tablier). Afin de répartir les sources dans la zone, le terminal Darsena Toscana a été divisé en sous-zones dans lesquelles travaillent les machines d'exploitation. En particulier, les éléments suivants ont été pris en compte : 13 Reach-Stackers, 7 Quay Cranes, 1 Transtainer du côté du chemin de fer, 12 Transtainers du côté du chantier. À l'aide de QGIS, il a été possible de positionner les sources à la bonne place et d'attribuer des attributs individuels à chacune d'elles. Les 9675 sources ont été positionnées et importées dans le logiciel de calcul avec lequel il sera possible de réaliser des simulations de propagation du bruit. Les attributs suivants ont été attribués à chaque source : niveau d'émission sonore, profil de fonctionnement horaire (102 niveaux d'émission sonore et 29 scénarios de fonctionnement horaire). Le modèle de calcul a été créé en important des courbes de niveau, des points d'élévation et des profils routiers. En chargeant les shapefiles créés avec QGIS, toutes les sources ont été importées en position correcte et les caractéristiques acoustiques et opérationnelles ainsi que la hauteur au-dessus du sol ont été attribuées. Chaque source s'est vue attribuer son propre groupe (électrifiable, non électrifiable, réfrigéré).

Des simulations ont été réalisées et des cartes de bruit ont été produites (figures III.10-15) pour les différents groupes aux intervalles de temps fixés au niveau européen (directive 2002/46/CE) : L_{DEN} (niveau jour-soir-nuit), niveau jour L_{day} (06:00 - 20:00), niveau soir $L_{evening}$ (20:00 - 22:00), niveau nuit L_{night} (22:00 - 06:00).

En particulier, la figure III.15 montre comment l'amélioration (exprimée en dB) est limitée dans l'hypothèse de moteurs électriques remplaçant les moteurs à propulsion traditionnelle. Toutefois, l'analyse, étendue à cette importante zone portuaire, présente un intérêt particulier pour la méthodologie adoptée et la répétabilité de la procédure dans des zones portuaires et des cours de marchandises présentant des caractéristiques similaires.



FIGURE VII.10 SCHEMA DES ZONES DE TRAVAIL DES MACHINES EN FONCTIONNEMENT

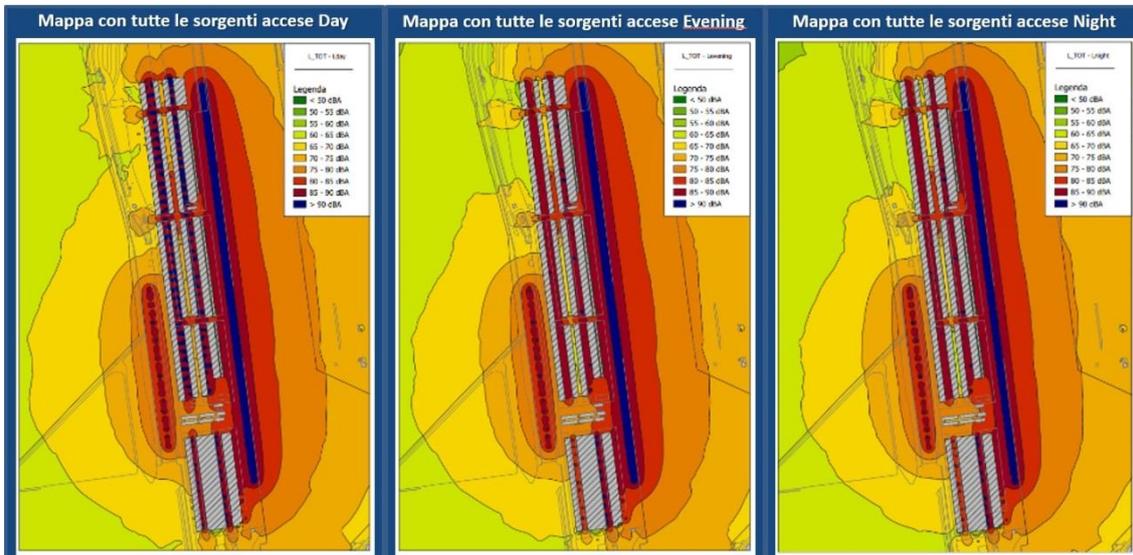


FIGURE VII.11 RESUME GRAPHIQUE DES RESULTATS DE SOUNDPLAN (CARTES ISLEVEL AVEC TOUTES LES SOURCES ACTIVEES)

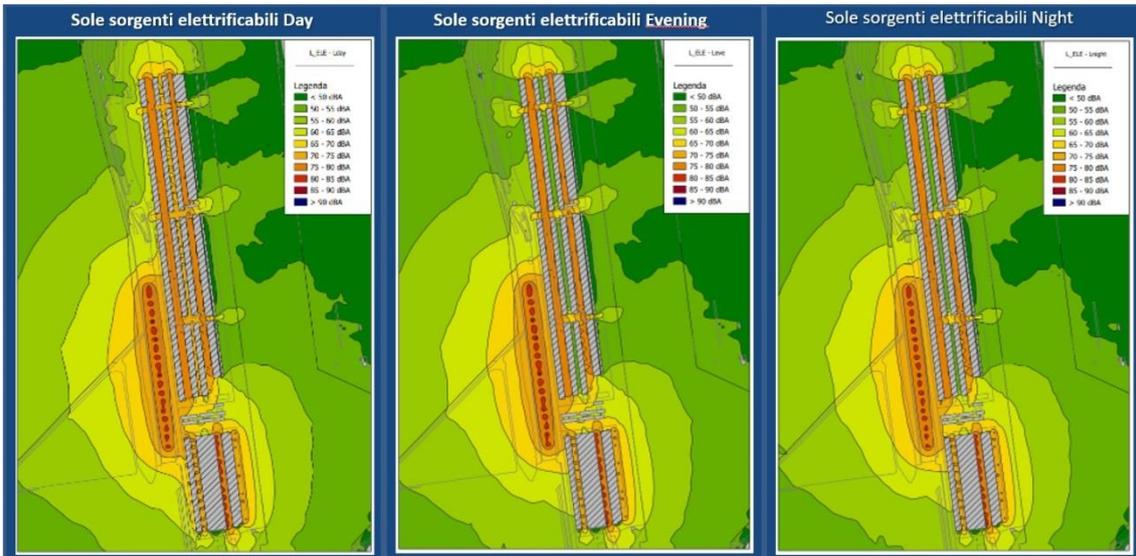


FIGURE VII.12 SYNTHÈSE GRAPHIQUE DES RESULTATS DE SOUNDPLAN (CARTES D'ISOLEMENT AVEC SOURCES ELECTRIFIABLES)

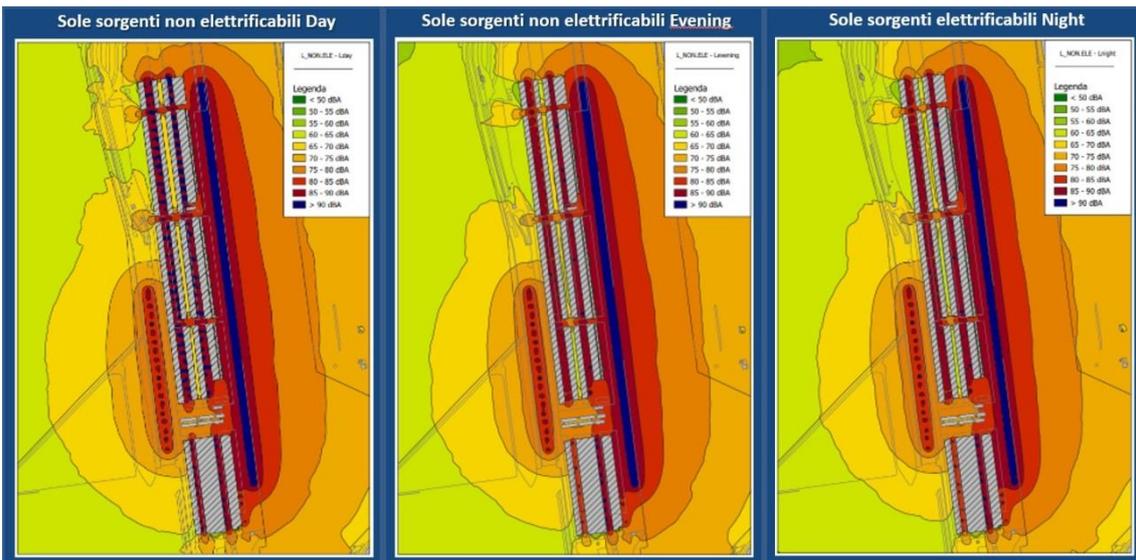


FIGURE VII.13 RESUME GRAPHIQUE DES RESULTATS DE SOUNDPLAN (CARTES D'ISOLEMENT AVEC SOURCES NON ELECTRIFIABLES)

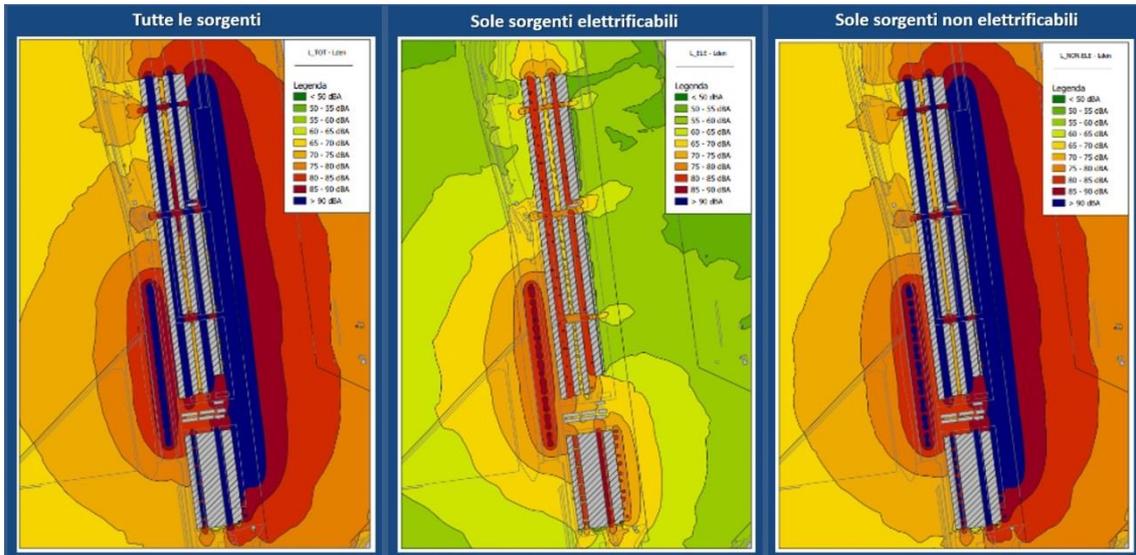


FIGURE VII.14 RESUME GRAPHIQUE DES RESULTATS DE SOUNDPLAN (CARTES DE NIVEAU DE COMPARAISON)



FIGURE VII.15 RESUME GRAPHIQUE DES RESULTATS DE SOUNDPLAN (CARTES DE NIVEAU DE COMPARAISON)

3. SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION

La validation a porté sur la modélisation acoustique de la zone industrielle "Terminal Darsena Toscana", en étudiant les améliorations en termes d'émissions sonores dues au remplacement de la propulsion traditionnelle par la propulsion électrique des machines d'exploitation.

La modélisation a été réalisée en utilisant comme données d'entrée les niveaux de puissance obtenus à partir des mesures effectuées sur les machines en

fonctionnement sur le site. Ces mesures ont été traitées de manière à pouvoir être facilement importées dans le programme de calcul SoundPLAN.

Une fois le modèle créé, les cartes de bruit ont été réalisées en supposant différents scénarios. Les scénarios évalués montrent les conditions actuelles d'émission de bruit des sources, l'émission due aux sources non électrifiables uniquement, l'émission due aux sources électrifiables uniquement et l'émission due aux unités de refroidissement uniquement.

Afin de vérifier si le passage à l'électricité pouvait entraîner une amélioration en termes d'émissions sonores, on a calculé la différence arithmétique entre l'émission produite par toutes les sources actuellement présentes dans la zone et la part due aux seules sources non électrifiables.

Cette différence montre que la réduction du bruit est faible par rapport au bruit de la zone et que l'amélioration est en tout cas limitée à la zone d'étude. Cela ne signifie pas que la transition est inutile, mais sur le plan acoustique, il n'y a pas de nette amélioration. Néanmoins, la transition pourrait apporter une amélioration des conditions de travail tant au niveau de l'acoustique qu'au niveau des vibrations induites au moteur thermique sur les machines en fonctionnement.

4. ÉLÉMENTS POUR LA RÉDACTION DE LIGNES DIRECTRICES

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

Les phases précédentes de l'analyse des émissions sonores des activités portuaires impliquant la manutention de marchandises et de personnes, de la vérification expérimentale, de la modélisation et de la validation du modèle, ont été développées à travers une série complexe d'activités, qui comprenaient notamment

- enquête sur les activités de manutention de marchandises avec des véhicules motorisés ;
- l'identification des sources sonores les plus importantes ;
- des mesures phonométriques in situ des émissions sonores de chaque source identifiée ;
- le post-traitement des résultats de mesure afin de caractériser l'émission de bruit des différentes sources ;
- formulation de scénarios pour le remplacement du système de propulsion des véhicules à moteur (du moteur à combustion au moteur électrique) ;
- Simulation de la propagation sonore des émissions de bruit vers les récepteurs sensibles, dans l'état actuel et simulé (véhicules à moteur électrique).

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

- créer une base de données sur les émissions des sources de bruit généralement présentes dans les ports, mais pour lesquelles peu de données sont disponibles dans la littérature technique et scientifique ;
- subdiviser l'émission de bruit en une série détaillée de sous-opérations que la source (typiquement un véhicule à moteur impliqué dans la manutention de marchandises) effectue de manière répétitive, ce qui a permis de mettre en évidence les sous-opérations présentant une émission de bruit plus élevée et de caractériser leur analyse fréquentielle ;
- évaluer l'importance des émissions sonores produites par les éléments actifs de la manutention des marchandises (conteneurs) par rapport à celles du moteur à combustion du véhicule individuel ;
- simuler le remplacement (en termes d'émissions sonores) du moteur à combustion du véhicule par un moteur électrique, les autres composants restant inchangés ;
- Si l'on évalue l'ampleur de la réduction des émissions sonores due à cette substitution dans la zone portuaire et vers les récepteurs sensibles, cette ampleur est plutôt modeste compte tenu de la prédominance des émissions sonores dues aux composants actifs dans la manutention des marchandises.

SEZIONE VIII.ÉVALUATION DES COÛTS SOCIAUX LIÉS À LA POLLUTION SONORE DANS LES PORTS (

1. INTRODUCTION

La pollution sonore, c'est-à-dire un niveau de bruit élevé ou gênant 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 section est d'évaluer les coûts sociaux associés à la pollution sonore dans les ports. À cette fin, nous avons utilisé l'approche de l'évaluation contingente pour étudier l'impact du bruit dans les ports de trois villes, à savoir Bastia (France) et Gênes et Livourne (Italie), ce qui nous a permis d'évaluer la *volonté de payer* (*Willingness To Pay*, WTP) de la population pour des mesures visant à réduire le bruit. Les estimations du CAP sont obtenues à partir d'un échantillon représentatif de résidents locaux, soit 400 interviews dans chaque ville. Il est demandé aux personnes interrogées d'écouter deux échantillons de bruit de 50 et 40 décibels respectivement, ce qui est un niveau standard pour les activités portuaires. Après l'écoute, les personnes interrogées expriment leur CAP pour la modification du niveau de bruit mentionnée ci-dessus. L'expérience montre que la VDP des résidents varie considérablement en fonction de leur localisation et de facteurs individuels. Enfin, certaines implications politiques sont brièvement discutées.

2. RÉSUMÉ DU PRODUIT T 2.4.1

L'objectif global à long terme du projet REPORT est d'atténuer les émissions sonores des ports de la zone de coopération transfrontalière afin de rendre les infrastructures portuaires de la zone maritime plus durables. Une évaluation des coûts sociaux encourus par les résidents en raison de la pollution sonore à proximité des ports a été réalisée. L'objectif de l'enquête était d'interroger les résidents de la municipalité au moyen de questionnaires en face à face, en utilisant la méthode de l'évaluation contingente.

Les travaux ont été réalisés en deux phases.

La première phase concernait la mise en œuvre du questionnaire. Pour réaliser le questionnaire, des entretiens semi-structurés ont été menés avec des experts dans les villes portuaires sélectionnées afin de valider une première version du questionnaire. L'objectif des entretiens et du groupe de discussion était d'obtenir des informations sur la pollution sonore dans les villes portuaires sélectionnées, en essayant de mettre en évidence les éventuels points critiques et les différences entre les différents ports. Ainsi, trois entretiens ont été menés avec des experts, un par ville portuaire de l'étude. Afin de disposer d'un spectre d'expertise aussi large

que possible, un représentant d'une compagnie maritime privée opérant dans les trois régions (Corse, Toscane et Ligurie) où sont situées les villes portuaires de l'étude a été interviewé à Bastia. Deux représentants d'organismes publics ont été interrogés dans les deux autres villes portuaires de l'étude : un représentant responsable de la pollution sonore dans la municipalité de Gênes et un représentant de l'autorité portuaire de Livourne. Enfin, pour bénéficier d'une expertise technique sur la pollution sonore, un groupe de discussion a été organisé avec des experts en acoustique de l'Université de Gênes.

Ces entretiens avec des experts et le groupe de discussion qui a suivi ont été deux éléments déterminants dans le développement du questionnaire pour identifier et mesurer le coût social associé à la pollution sonore dans les ports, qui identifie le produit T2.4.1 "Questionnaire d'enquête" du projet REPORT. En outre, des réunions avec des experts locaux et des groupes de discussion nous ont permis de déterminer les zones les plus touchées par le bruit portuaire afin de restreindre l'analyse à ces seules zones. Les zones suivantes ont ainsi été identifiées : les quartiers Municipio I et Municipio II de Gênes ; les quartiers Venezia Nuova et San Marco (Circoscrizione 2) de Livourne ; la zone comprise entre les quartiers San Giuseppe et Toga de Bastia.

La deuxième phase a consisté en l'administration de questionnaires par différents prestataires de services dans le cadre d'entretiens en face à face. L'échantillonnage a été réalisé de manière aléatoire selon la méthode des quotas (basés sur l'âge et le sexe) afin d'assurer une représentativité maximale de l'échantillon. Le nombre attendu de questionnaires était de 400 par ville.

Le questionnaire se composait de trois parties distinctes. Dans la première partie, nous nous sommes concentrés sur le lieu de résidence des répondants et leur sensibilité aux nuisances sonores. Une série de 23 questions nous a permis de déterminer l'intensité de la sensibilité des répondants au bruit portuaire.

La deuxième partie contient l'expérience d'analyse contingente : les répondants étaient invités à payer un montant (tiré au hasard selon une distribution uniforme) compris entre 1 et 50 euros pour obtenir une réduction de 10 décibels du niveau de bruit à l'intérieur de leur maison, de 50 à 40 décibels. À cette fin, deux échantillons de bruit de port de 20 secondes ont été diffusés, l'un de 50 décibels et l'autre de 40 décibels. Le vecteur de paiement correspond à un nouvel impôt local annuel à appliquer pendant 5 ans. La taxe est identique pour toutes les familles fiscales et les sommes collectées serviront exclusivement à financer l'électrification des quais (installation et maintenance des bornes électriques). Cette partie nous a permis de déterminer la volonté de contribution des habitants des villes portuaires sélectionnées et a fait l'objet du produit T2.4.2.

La dernière partie du questionnaire comprend des questions finales permettant de reconstituer le profil du répondant.

Projet REPORT « Rumore e Porti »

Questionario n° _____

Nell'ambito di un progetto europeo Marittimo, stiamo realizzando uno studio per valutare i costi sociali sostenuti dai residenti a causa dell'inquinamento acustico in prossimità dei porti. In effetti, i porti sono fonte di una serie di disagi. Siamo interessati non solo allo studio delle fonti di inquinamento acustico (rumore da imbarcazioni, imbarco, ecc.). Questo inquinamento acustico ha dei costi, in particolare per la salute (disturbi del sonno che possono causare incidenti stradali, disagio, malattie cardiovascolari, sordità, difficoltà di concentrazione, che possono portare, come hanno dimostrato gli studi, a ritardi nell'apprendimento della lettura in alcuni bambini). L'indagine è completamente anonima, a fini scientifici. Potrebbe darci qualche minuto per rispondere al nostro questionario?

Parte 1 : La vostra abitazione e l'inquinamento acustico :

Inizieremo rivolgendovi alcune domande sull'ambiente in cui vivete.

1. Vivi a Livorno / Bastia / Genova durante l'anno? (Se la persona non vive in una di queste città, non somministrare il questionario.)

Se la risposta alla prima domanda è una delle città oggetto dello studio

2. In quale quartiere : _____
A quale indirizzo ? _____
3. Nella vostra casa siete :
 Proprietario Affittuario Ospitato a titolo gratuito
4. Abitate in:
 Una casa intera
 Un appartamento ; a quale piano : _____
 Un altro tipo di abitazione; specificare : _____
5. Di che tipo di vetrate è dotata la vostra casa nella parte più esposta al rumore?
 Vetri singoli
 Doppi vetri
 Tripli vetri
 Altro; specificare : _____

La coopération au cœur de la Méditerranée

1

FIGURE VIII.1 PAGE 1 DU QUESTIONNAIRE

3. RÉSUMÉ DU PRODUIT T2.4.2

Les trois ports examinés se caractérisent par leur taille et leur vocation différentes. Bastia, avec une population de 45 000 habitants, est la principale porte d'entrée de la Corse et est particulièrement dédiée à la plaisance et au transport par ferry.

Livourne (environ 160 000 habitants) est le principal port de Toscane, avec de nombreuses liaisons par ferry depuis et vers la Corse et la Sardaigne. Elle compte plusieurs industries autour de la zone urbaine et constitue un important nœud ferroviaire dans la région. Gênes est la sixième plus grande ville d'Italie et compte environ 600 000 habitants. Le port de Gênes, avec un volume de commerce de 58,6 millions de tonnes, se classe au premier rang en Italie (ISTAT, 2007) et au 15e rang en Europe (AAPA, 2014).

Les trois villes présentent clairement des niveaux différents de trafic et donc de pollution. Du point de vue des politiques publiques, il est essentiel d'estimer les coûts sociaux liés à la réduction de la qualité de vie des résidents afin d'identifier la politique appropriée à 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. Pour accroître l'efficacité de la mise en œuvre de ces mesures, une analyse coûts-avantages peut aider les décideurs à estimer l'avantage net d'un projet ou d'une option. En général, les avantages sont plus difficiles à estimer que les coûts. Dans ce cadre, l'évaluation contingente fournit une approche directe basée sur une enquête pour obtenir une évaluation monétaire de l'état de santé d'un individu.

Ce document examine un cas particulier de pollution portuaire : la pollution sonore. La pollution sonore est un niveau de bruit élevé ou gênant dans une zone donnée et est devenue un problème environnemental important pour de nombreuses autorités portuaires en Europe et en Amérique du Nord. Notre étude vise à estimer la volonté de payer pour des améliorations de la qualité de vie des participants. Les estimations de la VDP sont obtenues à partir d'un échantillon représentatif de résidents locaux, représentant 400 entretiens dans chaque ville incluse dans l'expérience. Il est demandé aux personnes interrogées d'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 l'expérience est l'électrification des équipements portuaires qui permettra d'éteindre les générateurs électriques des ferries et des cargos. La personne interrogée se voit alors proposer l'un des dix niveaux de prix différents à 30 euros : 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 35 ou 50 euros. Chaque personne interrogée indique si elle accepte ou non de payer la valeur proposée. De cette manière, les personnes interrogées expriment indirectement leur CAP pour la modification du niveau de bruit susmentionnée, et cette expérience nous permet de déterminer le CAP moyen dans les trois ports étudiés.

Les coefficients du modèle économétrique ont des signes cohérents et la plupart d'entre eux sont statistiquement significatifs. Le coefficient associé à la variable

"DIS" est négatif, ce qui indique que les répondants sont moins susceptibles d'accepter des valeurs fiscales locales plus élevées. La taille du coefficient est plus importante, en termes absolus, pour Livourne, ce qui indique que les exigences plus élevées ont tendance à décourager davantage les résidents de Livourne que les répondants des deux autres villes. Les variables "SENSIBILITÉ" et "SANTÉ" sont positives et significatives. Une sensibilité élevée au bruit et une sensibilisation à la pollution sonore sont associées à un CAP plus élevé. L'exposition générale au bruit est significativement et positivement corrélée avec la volonté individuelle de contribuer, bien que l'effet diminue à mesure que l'exposition augmente. Les femmes, en moyenne, présentent une diminution de la VDP. Enfin, les individus ayant le plus haut niveau d'éducation ont une VDP plus élevée.

Les mesures du CAP sont dérivées des paramètres estimés par une analyse probit. Les valeurs moyennes annuelles vont de 28,11 euros dans le cas de Bastia à 105,88 euros pour Gênes, tandis que les valeurs médianes vont de 26,36 euros à 99,05 euros pour chacune de ces villes respectivement. En résumé, les résultats indiquent qu'il existe un CAP significatif pour la réduction du bruit dans les ports. En outre, ces valeurs sont influencées par le lieu. Comme prévu, Gênes a un CAP plus élevé que Livourne et Bastia. Cela est clairement dû à une plus grande exposition des habitants aux nuisances sonores. Cependant, même dans le cas de Bastia, l'étude montre toujours un CAP significatif pour la réduction du bruit.

4. SUMMARY ELEMENTS OF MODEL VALIDATION

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 sont 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 essaie d'expliquer le "combien", dans les modèles avec des variables dépendantes binaires, on essaie d'expliquer le "si". Le modèle utilisé contient un certain nombre de covariables qui sont censées influencer la volonté de payer (WTP) de l'individu. Tout d'abord, nous contrôlons les trois villes : BASTIA, GENOA et LIVORNO sont trois variables muettes qui prennent la valeur un si le répondant vient de Bastia, Gênes et 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 un 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 un si le répondant est une femme. EDUCATION mesure le niveau d'éducation du répondant (échelle 0-4). Enfin, KID prend la valeur un si le répondant a des enfants.

Tableau VIII.1 montre 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) | |
| SENSIBILITÉ | 0.160** (0.071) | 0.143* (0.073) | 0.173** (0.083) | 0.147*** (0.056) |
| SANTÉ | 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) | |
| BRUIT | 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) |
| PLANCHER | 0.012*** (0.002) | 0.010 (0.007) | 0.026 (0.018) | 0.013** (0.005) |
| AGE | -0.003 | -0.003 | -0.001 | |

| | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | (0.004) | (0.003) | (0.003) | |
| SEXE | -0.171* | -0.149* | -0.133* | -0.162* |
| | (0.103) | (0.083) | (0.080) | (0.089) |
| EDUCATION | 0.085*** | 0.175*** | 0.210*** | 0.120*** |
| | (0.015) | (0.021) | (0.057) | (0.026) |
| KID | 0.233 | 0.222 | 0.212 | |
| | (0.211) | (0.204) | (0.201) | |
| Constant | | -1.554*** | -1.749*** | |
| | | (0.184) | (0.281) | |
| Compte R ² | 0.800 | 0.793 | 0.792 | 0.798 |
| McFadden's R ² | 0.125 | 0.099 | 0.072 | 0.117 |
| R de McFadden ² (ajusté) | 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 |
| Test de Wald | 120.01*** | 95.21*** | 69.78*** | 112.36*** |
| Observations | 928 | 928 | 928 | 928 |

Erreurs standard robustes entre parenthèses ; *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

TABLEAU VIII.1 DETERMINANTS DE LA FONCTION WTP

Plusieurs mesures de la qualité de l'ajustement ont été proposées pour les modèles de choix binaires ; un test largement utilisé 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 R de McFadden ²ajusté corrige la valeur précédente pour le nombre de paramètres estimés. Count R² compare les prédictions corrigées avec les prédictions non corrigées 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 LA RÉDACTION DE LIGNES DIRECTRICES

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

Cette étude tente de combler certaines de ces lacunes dans la littérature. Il examine le CAP associé à la réduction du bruit en utilisant trois villes comme études de cas, à savoir Bastia, Gênes et Livourne. En utilisant une approche d'évaluation contingente concernant les préférences individuelles pour une réduction de 10db de la pollution sonore, l'approche identifie une volonté significative de contribuer à une éventuelle intervention publique. Plus précisément, 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 sonores, notamment la nuit. Nos estimations montrent que la population de Gênes a la volonté moyenne de payer la plus élevée (105,88 € x 5 ans = 529,40 €), suivie par Livourne (66,15 € x 5 ans = 330,75 €) et Bastia (28,11 € x 5 ans = 140,55 €).

L'importance 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 du quai a été analysé.

Index des figures

| | |
|--|----|
| Figure V.1 : Des premières idées proposées par les experts (à gauche) à leur mise en œuvre dans le logiciel (à droite)..... | 32 |
| Figure V.2 : Exemple de données d'entrée pour la méthode 2bis..... | 40 |
| Figure V.3 : Exemple de développement urbain avec réduction du bruit portuaire | 44 |
| Figure V.4 : Les jetées du port de Cagliari correspondant aux scénarios modélisés : jetée " Sabaudo " en rouge, jetée " Dente Sabaudo " en jaune et jetée " Levante Rinascita " en vert..... | 46 |
| Figure VI.5 - Diagramme schématique du système ITS..... | 59 |
| Figure VI.6 - Positions des mesures de bruit sur les orthophotos..... | 61 |
| Figure VI.7 - Emplacements des relevés phonométriques ex ante de la campagne de la période douce (mars 2019). | 63 |
| Figure VI.8 - Emplacements des mesures de bruit de la campagne ex-ante en période de pointe (août 2019)..... | 64 |
| Figure VI.9 - Sections de l'enquête sur le flux de trafic | 65 |
| Figure VI.10 - Graphique global cumulé des flux de trafic section 3c dir. 1 période douce..... | 65 |
| Figure VI.11 - Graphique global cumulé des flux de trafic section 3c dir. 1 période de pointe | 66 |
| Figure VI.12 - Tendances du trafic de véhicules et du bruit détecté. Les périodes auxquelles se rapportent les données considérées pour l'ensemble d'entraînement et l'ensemble de test avec la deuxième stratégie sont mises en évidence..... | 68 |
| Figure VI.13 - Erreur pendant la phase de test entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées par le modèle. | 68 |
| Figure VI.14 - LeqA acquis expérimentalement (vert) et prédit par ANN (points rouges), en haut. Différence entre les valeurs calculées et expérimentales, en bas. Station A : période douce du 25 au 28 mars 2019. | 69 |
| Figure VI.15 - LeqA acquis expérimentalement (vert) et prédit par ANN (points rouges), en haut. Différence entre les valeurs calculées et expérimentales, en bas. Station A période de pointe 23-26 août | 70 |
| Figure VI.16 - Emplacement des sections d'enquête | 73 |
| Figure VI.17 - Comparaison été-automne des 13 sections de surveillance..... | 74 |
| Figure VI.18 - Arches encombrées | 76 |
| Figure VI.19 - Les zones de plus grande congestion | 78 |
| Figure VI.20 : Points de contrôle du trafic sur le réseau routier de base d'Olbia | 79 |
| Tableau VI.5 - Débits simulés aux points indiqués sur la Figure VI.21 | 79 |
| Figure VI.22 - Points de contrôle de la congestion routière | 80 |
| Figure VI.23 - Le PMV existant près du | 81 |
| Figure VI.24 - Le PMV existant dans l'accès..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figure VI.25 - Le nouveau PMV n° 1 - emplacement général | 82 |
| Figure VI.26 - Le nouveau PMV n.2 - emplacement général | 83 |
| Figure VI.27 - Plan de localisation des infrastructures de détection et d'info-mobilité | 85 |
| Figure VI.28 : Emplacement 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. | 86 |
| Figure VI.29 Exemple d'ensemble de données synthétiques, complété par un terme dynamique, transitoire et stationnaire. Chaque couleur représente une classe de véhicules et un sens de circulation. | 89 |
| Figure VI.30 détail de la transition de la figure VI.29. Chaque couleur représente une classe de véhicules et un sens de circulation. | 90 |
| Figure VI.31 Carte des emplacements de mesure. En vert les points de la première série, en bleu les points de la deuxième série de suivi | 95 |
| Figure VI.32 Détail du point Pb5 du rapport fourni par le contractant | 95 |
| Figure VI.33 Détail du point CT-99 du rapport fourni par le contractant | 96 |
| Figure VI.34 Comparaison des tendances des valeurs expérimentales et simulées de Leq, 1hr au point de mesure PA1. Figure 4B Tendance de l'erreur de prédiction à PA1 | 97 |
| Figure VI.35 Comparaison des tendances des valeurs expérimentales et simulées de Leq, 1hr au point de mesure PA2. Figure 5B Tendance de l'erreur de prédiction à PA2 | 98 |
| Figure VI.36 Comparaison des tendances des valeurs expérimentales et simulées de Leq, 1hr au point de mesure PA3. Figure 6B Tendance de l'erreur de prédiction .. | 98 |
| Figure VII.1 - Relevé photographique de la zone TDT, Port de Livourne | 113 |
| Figure VII.2 - Plan schématique de la zone TDT, Port de Livourne | 113 |
| Figure VII.3 : Exemple d'équipement de manutention et de parc à conteneurs ... | 113 |
| Figure VII.4 - Port de Livourne, sources de bruit dans la zone TDT : (A) Grue de quai, (B) Empileur à portée, (C) Transtainer, côté chemin de fer, (D) Transtainer, côté cour principale, (E) Frigo à conteneurs. Bruit dans l'environnement : (F) Bureaux du TDT, (G) Porte des douanes, (H) Zone pré-porte | 114 |
| Figure VII.5 : Exemple de procédure de mesure et de post-traitement (étape 1) . | 117 |
| Figure VII.6 : Exemple de procédure de mesure et de post-traitement (étape 2) . | 117 |
| Figure VII.7 : Exemple de procédure de mesure et de post-traitement (étape 3) . | 117 |
| Figure VII.8 : Exemple de procédure de mesure et de post-traitement (étape 4) . | 118 |
| Figure VII.9 : Exemple de modélisation avec le logiciel iNOISE | 119 |
| Figure VII.10 : Schéma des zones de travail pour les machines de construction .. | 121 |
| Figure VII.11 : Résumé graphique des résultats de SoundPlan (cartes islevel avec toutes les sources activées) | 121 |

| | |
|---|-----|
| Figure VII.12 : Résumé graphique des résultats de SoundPlan (cartes d'isolement avec sources électrifiables)..... | 122 |
| Figure VII.13 : Résumé graphique des résultats de SoundPlan (cartes de niveau d'isolement avec sources non électrifiables)..... | 122 |
| Figure VII.14 : Résumé graphique des résultats de SoundPlan (cartes de niveau de comparaison)..... | 123 |
| Figure VII.15 : Résumé graphique des résultats de SoundPlan (cartes de contour de comparaison)..... | 123 |
| Figure VIII.1 : Page 1 du questionnaire | 128 |

Index des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau III.1 : Horaire synoptique des mesures acoustiques effectuées..... | 15 |
| Tableau IV.1 Comparaison entre les valeurs obtenues avec SoundPLAN et MithraSIG pour le scénario Molo Sabauda. | 20 |
| Tableau IV.2 : Comparaison entre les valeurs obtenues avec SoundPLAN et MithraSIG pour le scénario Molo Dente Sabauda..... | 20 |
| Tableau V.1 : Exemple de configuration du navire pour la méthode 1 | 34 |
| Tableau V.2 : Méthode 2 - configuration de la source - mode d'entrée du temps.. | 35 |
| Tableau V.3 : Méthode 1bis -- configuration de la source - mode d'entrée par période | 36 |
| Tableau V.4 : Exemple de configuration de la cuve pour la méthode 2 | 37 |
| Tableau V.5 : Méthode 2 - Configuration de la source - Entrée de l'heure..... | 37 |
| Tableau V.6 : Méthode 2 - Configuration de la source - Entrée de la période | 37 |
| Tableau V.7 : Exemple de configuration de la cuve pour la méthode 2-bis | 39 |
| Tableau V.8 Comparaison des valeurs obtenues avec SoundPLAN et MithraSIG. ... | 47 |
| Tableau VI.1 Emplacement des stations de mesure du bruit..... | 61 |
| Tableau VI.2 Emplacement des sections - principales intersections | 72 |
| Tableau VI.3 - Macro caractéristiques des simulations..... | 76 |
| Tableau VI.4 - Débits détectés dans les deux sections d'accès/de sortie les plus importantes de la zone urbaine d'Olbia..... | 78 |
| Tableau VI.5 - Débits simulés aux points indiqués sur la Figure VI.21 | 79 |
| Tableau VI.6 : Emplacement des détecteurs de trafic..... | 85 |
| Tableau VI.7 Composition horaire du trafic de véhicules de 11 heures à 12 heures Données récapitulatives avec une distribution équivalente à celle expérimentale mesurée de 11 heures à 12 heures le 26 août 2019..... | 88 |
| Tableau VI.8 Aperçu des valeurs prédites par le modèle ANN pour chaque scénario. | 92 |
| Tableau VII.1 Abréviations utilisées, nombre de mesures effectuées et nombre de cartes par source..... | 116 |
| Tableau VIII.1 : Déterminants de la fonction WTP | 132 |