

PROJET REPORT

“Bruit et Ports”

Livrable T2.1.2

Rapport technique sur l’implémentation du modèle portuaire dans Mithra-SIG

Composante T2

Activité T2.1

Date de livraison prévue : 03/2020

Date de livraison effective : 09/2020

Partner responsable : CSTB

Niveau de diffusion		
PU	Public	X
CO	Confidentiel	

Numéro du document à livrer :	T2.1.2
Responsable du document à livrer :	CSTB
Composante :	T2

Auteur/s – par ordre alphabétique		
Nom	Partner	E-mail
Jean-Benoit DUFOUR	Geomod	jbdufour@geomod.fr
Matthieu LAPICORÉ	Geomod	mlapicore@geomod.fr
Julien MAILLARD	CSTB	Julien.maillard@cstb.fr
Dirk VAN MAERCKE	CSTB	dirk.vanmaercke@cstb.fr

Révision du document			
Version	Date	Modifications	
		Type de modifications	Modifié par
V1	06/10/2020	Version initiale	Dirk Van Maercke
V2	20/10/2020	Contributions GEOMOD intégrés	Jean-Benoît Dufour
V3	18/11/2020	Version finale	Dirk Van Maercke
V4	18/01/2021	Relecture et corrections	Dirk Van Maercke

Synthese
<p>Ce document présente les principes techniques et ergonomiques de la fonctionnalité « Portuaire » telle qu'elle a été implémentée dans le logiciel MithraSIG v5 dans le cadre de la tâche T2.1.2 du projet REPORT.</p>

TABLE DES MATIERES

I - Introduction et contexte.....	4
II - Présentation du logiciel MithraSIG	5
II.1 - Modélisation du site.....	6
II.2 - Modélisation des sources.....	8
II.3 - Modélisation des récepteurs.....	10
II.4 - Principes du calcul.....	12
II.5 - Post-traitements.....	21
III - Modélisation des activités portuaires	25
III.1 - Modélisation des navires	26
III.2 - Modélisation des activités industrielles.....	43
III.3 - Trafic routier et ferroviaire	46
III.4 - Conditions météorologiques	47
IV - Implémentation du module portuaire dans MithraSIG.....	50
IV.1 - Création d'un navire	50
IV.2 - Représentation graphique d'un navire	51
IV.3 - Paramètres acoustiques du navire	51
IV.4 - Configuration des paramètres de calcul	54
IV.5 - Calcul des navires	55
IV.6 - Résultats des calculs.....	58
Annexe A – Modélisation à partir de mesures in situ	60
Annexe B – Classification acoustique des navires.....	68

I - Introduction et contexte

Les ports méditerranéens sont entourés de zones urbaines densément peuplées où le bruit généré par les sources sonores de leur activité a un impact très important. L'objectif à long terme du projet REPORT est la réduction des émissions sonores des ports de l'espace de coopération transfrontalier dans le but de rendre plus durables les installations portuaires de l'Espace Maritime. Ceci est effectué par le développement d'une approche dédiée de la gestion du bruit.

La création de modèles décrivant la propagation du son dans la zone portuaire est la première des étapes fondamentales à franchir pour parvenir à la définition de méthodes de réduction de la pollution sonore et des émissions de bruit en général. Ainsi, la composante T2 du projet a pour objectif de proposer une méthodologie de simulation multidisciplinaires pour effectuer des études d'impact du bruit émis dans les zones portuaires. Dans les tâches T3 et T4 des adaptations à la méthode CNOSSOS-EU seront proposées afin d'améliorer la prise en compte l'environnement portuaire dans la production des cartes de bruit stratégique et l'élaboration de plans d'actions. Ces améliorations seront implémentées dans le logiciel MithraSIG v5, permettant ainsi le traitement, la simulation de systèmes, les actions optimales pour un correct monitoring et des solutions d'atténuation transfrontalières en étroite collaboration avec les projets DECIBEL et MON ACUMEN.

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

Dans le cadre de la tâche T2.1.1, ces modifications ont été implémentées au sein d'un outil existant, le logiciel MithraSIG v5, codéveloppé par le CSTB et l'entreprise Geomod, dédié aux études d'impact acoustiques en extérieur et aux cartes de bruit stratégiques.

Ce rapport explicite les adaptations développées pour bien prendre en compte les spécificités des zones portuaires dans le cadre d'une analyse à l'échelle urbaine du bruit, que ce soit dans le cadre de l'établissement d'une cartographie d'exposition des populations à proximité des zones portuaires, d'une étude d'impact lors d'une modification ou d'un nouveau projet, ou encore de l'évaluation de l'effet d'un plan d'actions visant à réduire l'exposition des populations aux effets négatifs du bruit.

II - Présentation du logiciel MithraSIG

Les outils qui permettent l'analyse de l'exposition au bruit à l'échelle urbaine utilisent tous des concepts similaires :

- Données d'entrée **géographiques** (terrain, occupation du sol, ligne de littoral, tracés de routes...)
- Données d'entrée de **sources** (flux routier moyen par tronçon, nombre de passages de convois ferroviaires et type de matériel roulant, niveau de puissance de sources industrielles...)
- Données d'entrée **physiques** (conditions météorologiques, propriétés acoustiques des surfaces)
- **Paramètres de calcul** (nombre de réflexions, prise en compte de la diffraction)
- Définition des **rendus attendus** (type de cartes, type d'indicateurs, format du rendu)

Dans ce projet nous allons utiliser le logiciel MithraSIG commercialisé par la société Geomod : <https://www.geomod.fr/fr/geomatique-modelisation-3d/mithrasig/>.

MithraSIG se démarque des autres logiciels de simulation acoustique car il est basé sur un Système d'Information Géographique (SIG). Le SIG apporte l'ouverture et la pérennité de par sa richesse de formats maintenus en lecture comme en export, de fonctionnalités avancées de dessin et d'édition, d'analyse et de rendus.

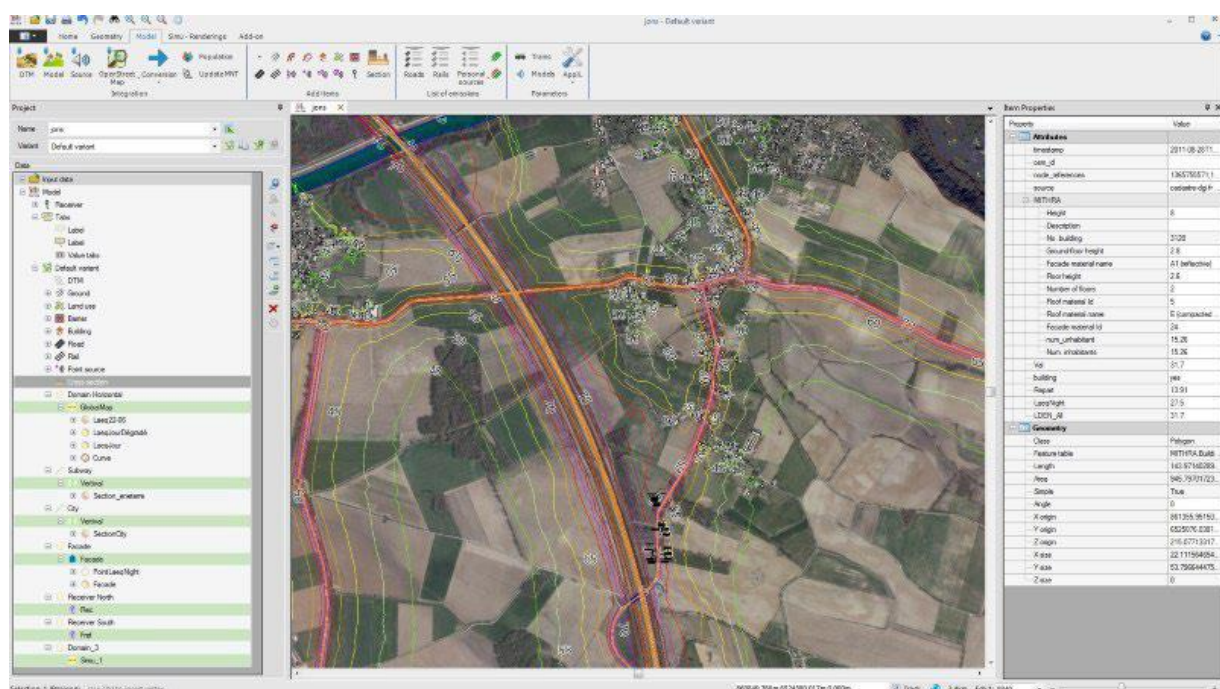


Figure 1- Exemple de modélisation d'un site dans MithraSIG

II.1 - Modélisation du site

MithraSIG a été conçu de façon à créer simplement son modèle de calcul.

Grâce à une interface simple et intuitive, la création du modèle est rapide. Elle se fait soit par l'intégration de données provenant de différents organismes, sous différentes formes et dans différents formats, soit manuellement grâce aux outils de dessin.

- Plus de 160 formats supportés (SHP, MIF/MID, TAB, DXF, DWG, DGN, etc...).
- Une création automatique de projet depuis les données SRTM et OpenStreetMap permettant de créer des projets de simulation acoustique rapidement.
- Des outils évolués de création et d'édition d'objets bénéficiant de toute la richesse du SIG.
- Des assistants dédiés à la création de thématiques, de requêtes spatiales et d'impressions.

La modélisation d'un site dans MithraSIG repose sur le principe général des systèmes d'information géométriques où chaque objet peut avoir (une ou plusieurs) représentations géométriques (en deux ou trois dimensions) et une liste de propriétés associées.

La table ci-dessous résume les types d'objets disponibles dans MithraSIG.

Type d'objet	Représentation géométrique	Propriétés
Fond de plan	Image géoréférencée	
Altitude du terrain	Points cotés Lignes d'altitude constante Lignes de rupture de pente	Altitude
Nature du terrain	Polygone 2D ou 3D	Nature du sol (minéral, eau, végétation...)
Murs et écrans	Polyligne 2D ou 3D	Hauteur Matériau absorbant (face avant / face arrière) Couronnement Inclinaison
Bâtiments	Polygone 2D ou 3D	Hauteur Classification (habitat collectif, tertiaire...) Matériau (toit/façade)

		Nombre d'étages Nombre d'habitants
Routes	Polyligne 2D ou 3D	Nombre de voies de circulation Largeur des voies Revêtement de chaussée Trafic (débit et vitesse) par catégorie de véhicules, par période d'analyse
Voies ferrées	Polyligne 2D ou 3D	Nombre de voies de circulation Caractéristiques des voies Trafic (débit et vitesse) par type de train, par période d'analyse
Sources industrielles	Points, lignes ou surfaces en 2D ou 3D	Puissance acoustique Directivité Scénario d'utilisation : mode de fonctionnement et % de temps d'activité par période d'analyse
Récepteur	Point 2D ou 3D	Hauteur au-dessus du sol Attachement à un bâtiment

Table 1 : Objets de la modélisation du site dans MithraSIG

A noter : lorsque les objets sont représentés par des constructions géométriques en 2D, le logiciel assignera automatiquement l'altitude en plaquant les coordonnées 2D sur le MNT (Modèle Numérique de Terrain) sous-jacent.



Figure 2 - Modèle MithraSIG construit depuis la base Open Street Map

La création des objets peut s'effectuer manuellement à travers les outils de dessin intégrés dans le SIG. Les propriétés des objets sont accessibles à travers des éditeurs (boîtes de dialogue) spécifiques.

Il est également possible d'automatiser la saisie par importation de tables de données SIG externes (intégration), comme par exemple des bases de données SIG nationaux (payants) ou libres de droits (comme Open Street Map).

II.2 - Modélisation des sources

En mode expert, MithraSIG permet la création de sources acoustiques élémentaires. Chaque source est alors définie en termes de :

- Sa position et forme géométrique (ponctuelle, linéique, surfacique)
- Son orientation
- Son spectre de puissance acoustique (en octaves ou tiers d'octaves)
- Sa directivité horizontale et verticale.

Dans la pratique toutefois, l'utilisateur n'aura pas à entrer dans ce niveau de détail puisque le logiciel fournit des modèles de sources spécifiques qui automatisent la création des sources élémentaires en entrée des calculs à partir d'une modélisation de plus haut niveau. MithraSIG permet de modéliser créer rapidement des sources associées aux émissions

- Routières,
- Ferroviaires,
- Industrielles.

Pour les sources routières et ferroviaires, la modélisation prend en compte la composition du trafic, le débit horaire, la vitesse de circulation et les caractéristiques de la voie de circulation.

Category	Name	Description	Vehicle category in EC Vehicle Type Approval
1	Light motor vehicles	Passenger cars, delivery vans \leq 3.5 tons, SUVs, MPVs including trailers and caravans	M1 and N1
2	Medium heavy vehicles	Medium heavy vehicles, delivery vans $>$ 3.5 tons, buses, motorhomes, etc. with two axles and twin tyre mounting on rear axle	M2, M3 and N2, N3
3	Heavy vehicles	Heavy duty vehicles, touring cars, buses, with three or more axles	M2 and N2 with trailer, M3 and N3
4	Powered two-wheelers	4a Two-, Three- and Four-wheel Mopeds	L1, L2, L6
		4b Motorcycles with and without sidecars, Tricycles and Quadricycles	L3, L4, L5, L7

Table 2 : Catégories de véhicules routiers compatibles avec la directive EU 2015/996

La saisie des paramètres du trafic est indépendante de la méthode de calcul et se base sur les développements les plus récents. Par exemple, la modélisation des sources routières se base sur les catégories de véhicules retenues dans la méthode Européenne. La modélisation du trafic ferroviaire exploite une base de données du matériel roulant compatible avec la directive EU 2015/996.

Pour les sources industrielles, MithraSIG exploite la base de données initialement proposée par le projet IMAGINE et étendue par la suite. La puissance acoustique de chaque source peut être modulée en fonction de la fraction du temps de fonctionnement de l'installation.

Les données d'émission peuvent être définies pour plusieurs scénarios d'utilisation. Chaque scénario correspond à une période temporelle particulière et les conditions de fonctionnement des sources peuvent être définies séparément pour chaque période de temps. Lors du calcul, tous les scénarios sont évalués en parallèle, ce qui permet, à partir d'un seul calcul :

- D'évaluer la variation horaire du niveau Leq,A .

- De calculer des niveaux jour/soirée/nuit et des indicateurs LDEN et Lnight.
- De comparer des situations actuelles/futures, variation des niveaux sonores dues à l'augmentation du trafic, le remplacement de véhicules par des modèles moins bruyants et/ou à une modification au niveau de l'infrastructure (par exemple après mise en place d'un revêtement de chaussée poreux).

II.3 - Modélisation des récepteurs

MithraSIG permet de calculer des cartes de niveaux sonores dans les plans horizontaux et verticaux, des cartes en façade de bâtiments et des cartes basées sur des récepteurs ponctuels. Ces cartes sont réalisées sur une surface donnée appelée "Domaine".

Dans MithraSIG, on ajoute des domaines (zones de calcul), puis des calculs qu'on leur associe. Un même domaine peut donc être associé à plusieurs calculs différents. De même, un calcul peut comporter plusieurs domaines distincts, ce qui permet de réaliser en une seule fois une carte horizontale et une carte en façade en gardant les mêmes paramètres entre les domaines.

Chaque calcul peut être paramétré en termes de méthode géométrique pour la recherche de trajets de propagation et en terme de méthode calcul acoustique (voir ci-après).

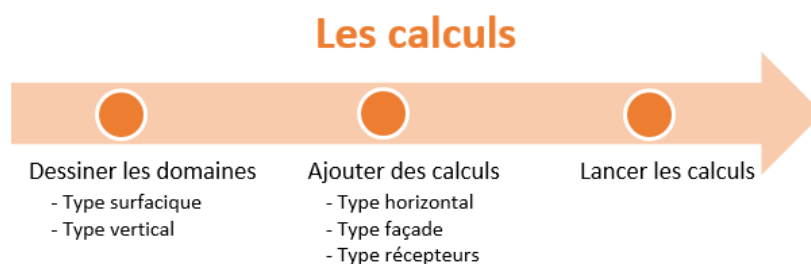


Figure 3 – Configuration des calculs par domaines

II.3.1 - Cartes horizontales

Ce type de calcul correspond à des coupes dans le plan horizontal en extérieur à une hauteur donnée. Ce calcul se fait sur un domaine surfacique. Plusieurs méthodes de maillage sont possibles en fonction de la précision et des temps de calcul voulus.

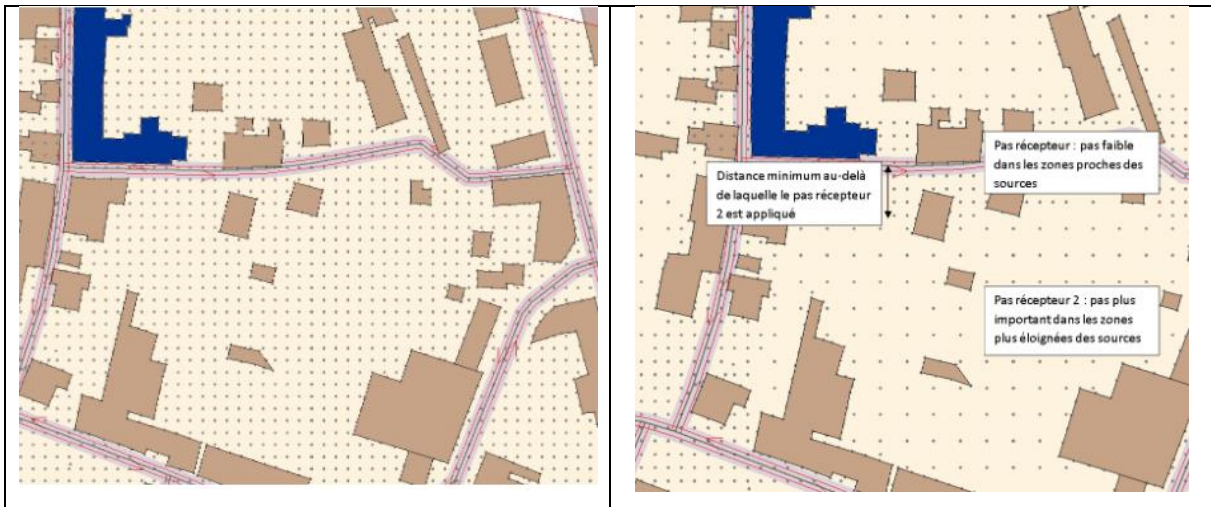


Figure 4 - Maillage horizontal régulier (gauche) ou irrégulier, plus dense proche des sources et des bâtiments (droite)

II.3.2 - Calcul en façades

Dans ce type de calcul, chaque bâtiment du domaine est matérialisé par ses façades. Un calcul s'effectue pour chaque façade, à chaque étage des bâtiments. Ce calcul se fait sur un domaine surfacique. Les façades de tous les bâtiments à l'intérieur de cette surface seront calculées.

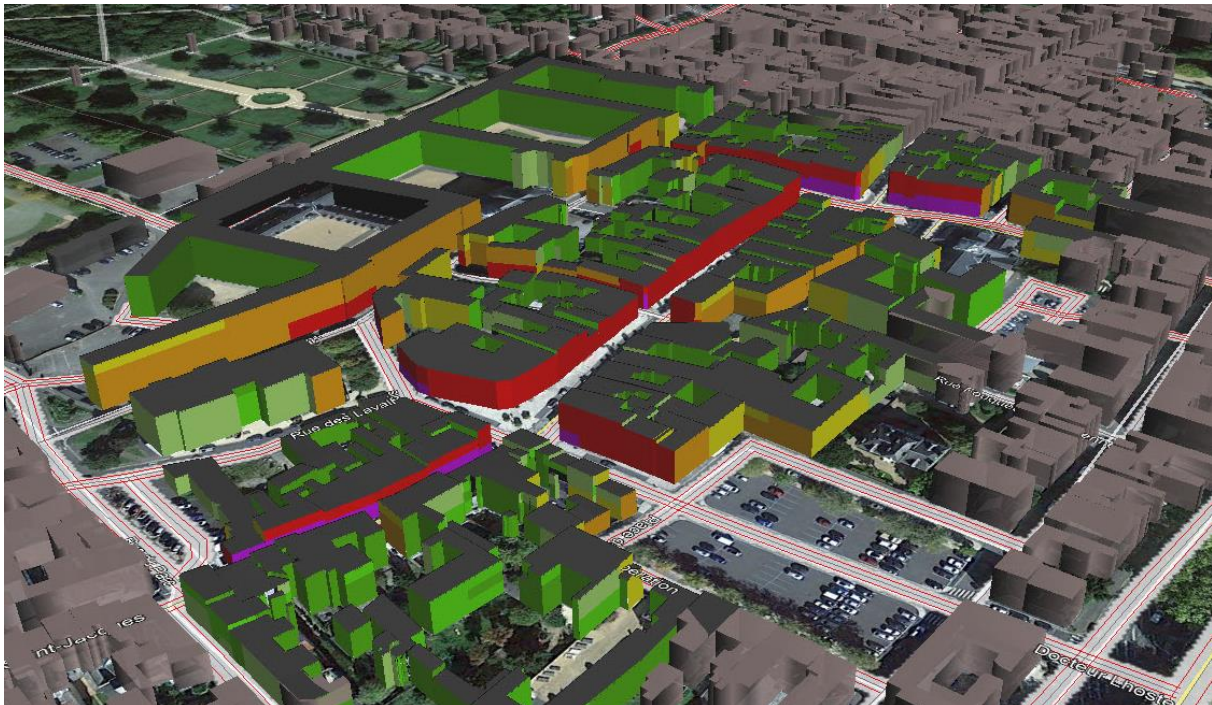


Figure 5 - Calcul en facade MithraSIG

II.3.3 - Cartes verticales

Ce type de calcul correspond à des coupes dans le plan vertical selon un trait de coupe dessiné. La coupe est matérialisée par une ligne représentant le plan de coupe.

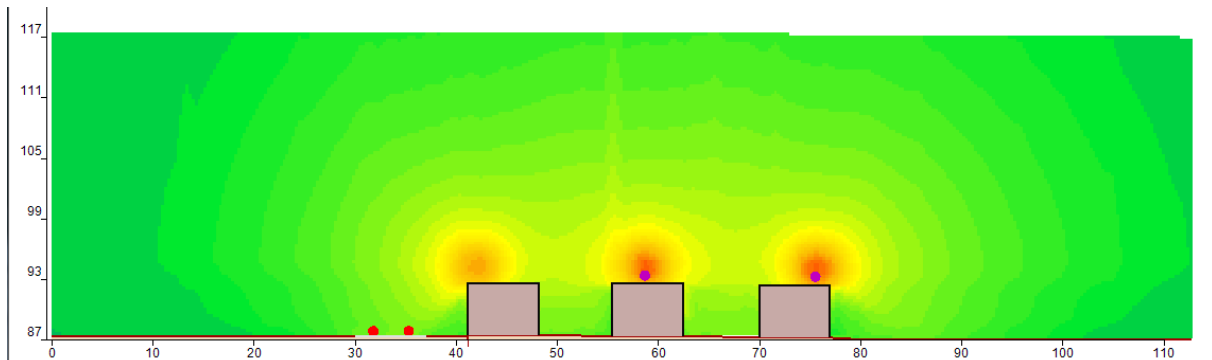


Figure 6 - Coupe verticale représentant des pompes à chaleur dans un lotissement

II.3.4 - Calcul sur récepteurs

Ce type de calcul est fait pour les récepteurs positionnés manuellement lors de la création du modèle. Il existe trois types de récepteurs :

- Les récepteurs en façade (1 récepteur par étage).
- Les récepteurs sur bâtiment (placés sur le toit).
- Les récepteurs en champ libre.

Dans la fenêtre graphique du logiciel, les récepteurs sont matérialisés par des objets de type point. Chaque type de récepteur possède son symbole de représentation.

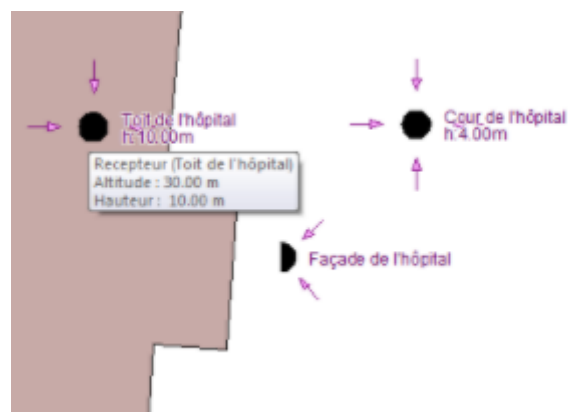


Figure 7 - Représentation des récepteurs dans la fenêtre graphique du logiciel

II.4 - Principes du calcul

Pour le calcul, le logiciel MithraSIG exploite des moteurs de calcul développés par le CSTB. Les moteurs intègrent d'une part un puissant moteur de modélisation géométrique et de

recherche des trajets et d'autre part un ensemble de moteurs pour le calcul des puissances des sources et des effets liés à la propagation du son.

II.4.1 - Modélisation du site

Le moteur de modélisation géométrique intègre l'ensemble des éléments géométriques du site dans un modèle numérique de terrain (MNT) unique, sous la forme d'une triangulation sous contraintes. La modélisation affecte ensuite une altitude spécifique à chaque nœud de la triangulation, soit à partir des données fournies par l'utilisateur, soit par interpolation sur les points intermédiaires.

Un soin particulier est apporté à la modélisation des surfaces à altitude constante (comme les surfaces d'eau) ou à pente régulière (comme les plateformes routières et ferroviaires).

Chaque cellule de la triangulation est affectée d'une nature de sol particulière. Afin de garantir une compatibilité avec les différentes méthodes de calcul, le logiciel utilise la table d'équivalence ci-dessous, mise au point par le projet CNOSSOS-EU. L'affectation de la nature est effectuée à partir des zones de sol définies par l'utilisateur. Lorsque plusieurs zones se superposent, la nature du sol est déterminée en appliquant la règle de « la plus petite surface qui entoure une position ».

Description	Type	σ (kPa·s/m ²)	G value
Very soft (snow or moss-like)	A	12.5	1
Soft forest floor (short, dense heather-like or thick moss)	B	31.5	1
Uncompacted, loose ground (turf, grass, loose soil)	C	80	1
Normal uncompacted ground (forest floors, pasture field)	D	200	1
Compacted field and gravel (compacted lawns, park area)	E	500	0.7
Compacted dense ground (gravel road, car park)	F	2000	0.3
Hard surfaces (most normal asphalt, concrete)	G	20 000	0
Very hard and dense surfaces (dense asphalt, concrete, water)	H	200 000	0

Table 3 : Nature du sol et équivalence des caractéristiques retenues dans les calculs

Le MNT sert ensuite de support pour la création du modèle numérique d'élévation (MNE) qui intègre tous les objets à face verticaux comme les murs, écrans et bâtiments. Ces éléments sont modélisés par leur empreinte au sol et par leur élévation au-dessus de celui-ci. L'élévation d'un objet peut varier d'un point à l'autre. Les faces et arêtes des surfaces verticales sont utilisées pour la recherche des trajets diffractés ou réfléchis.

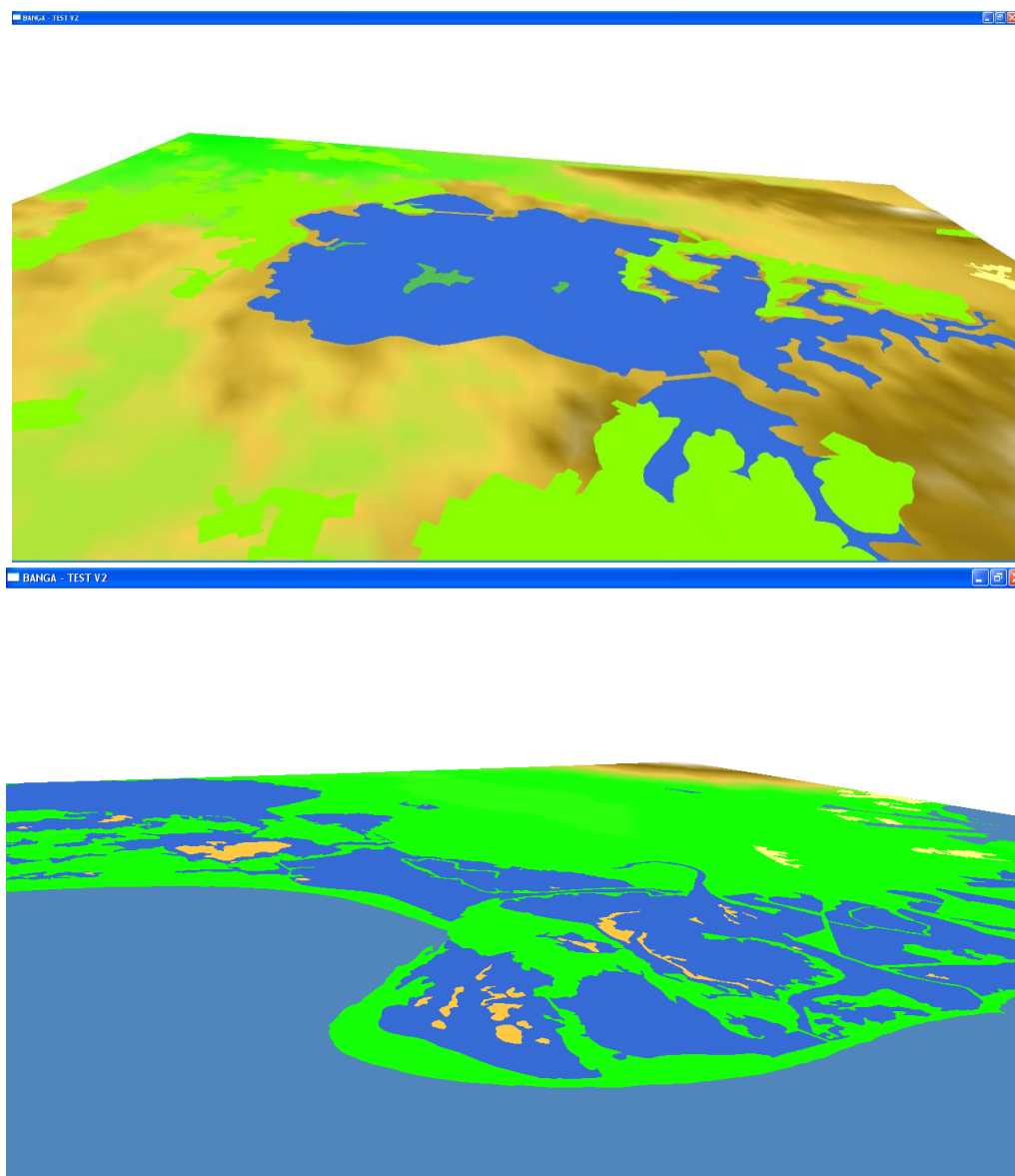


Figure 8 – Construction du MNT et affectation de la nature du sol dans le moteur BANGA. L'utilisation de la règle du "plus petit polygone fermé" permet de modéliser rapidement des lacs à l'intérieur des terres (image du haut)

et/ou des îles entourées de surfaces d'eau (image du bas).

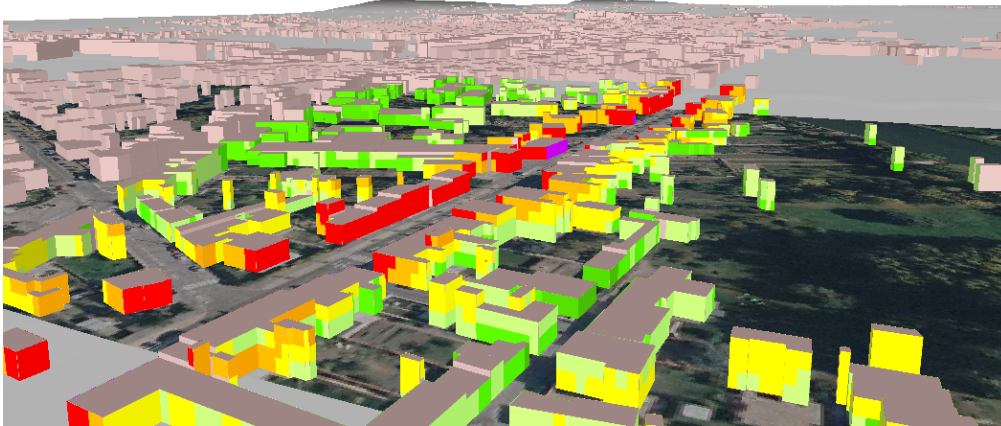


Figure 9 – Construction du MNE comportant les façades et toitures des bâtiments

II.4.2 - Recherche des trajets de propagation

La recherche des trajets de propagation entre les sources sonores et les récepteurs est basée sur un algorithme puissant et efficace développé par le CSTB. Cet algorithme utilise un tir de rayons « inverse » en recherchant les sources visibles depuis le récepteur.

L'espace entourant le récepteur est découpé en secteurs angulaires. L'algorithme existe en deux versions : soit un rayon unique est tiré au centre de chaque secteur (tir de rayons), soit les deux rayons encadrant le secteur sont propagés en parallèle (méthodes des faisceaux).

Lorsqu'un rayon (ou un faisceau) intercepte un obstacle réfléchissant (mur, écran ou bâtiment) deux nouveaux chemins de recherche sont créés : l'un qui se propage en ligne droite afin de détecter d'éventuelles sources se situant derrière l'obstacle (et éventuellement masquées par celui-ci), l'autre correspondant à une réflexion spéculaire du trajet (donnant lieu à d'éventuelles sources images). Ce principe est illustré dans la figure ci-dessous. Un rayon partant du récepteur R intercepte un premier bâtiment au point 1 ; deux nouveaux rayons sont générés, l'un vers 5, l'autre vers 2. Au point 2 le rayon rencontre de nouveau un bâtiment et deux nouveaux trajets sont générés, l'un vers 6, l'autre vers 3. Au point 3, le trajet passe au-dessus d'un écran (la réflexion sur l'écran a été omis afin de ne pas encombrer l'illustration) et atteint une ligne source au point 4.

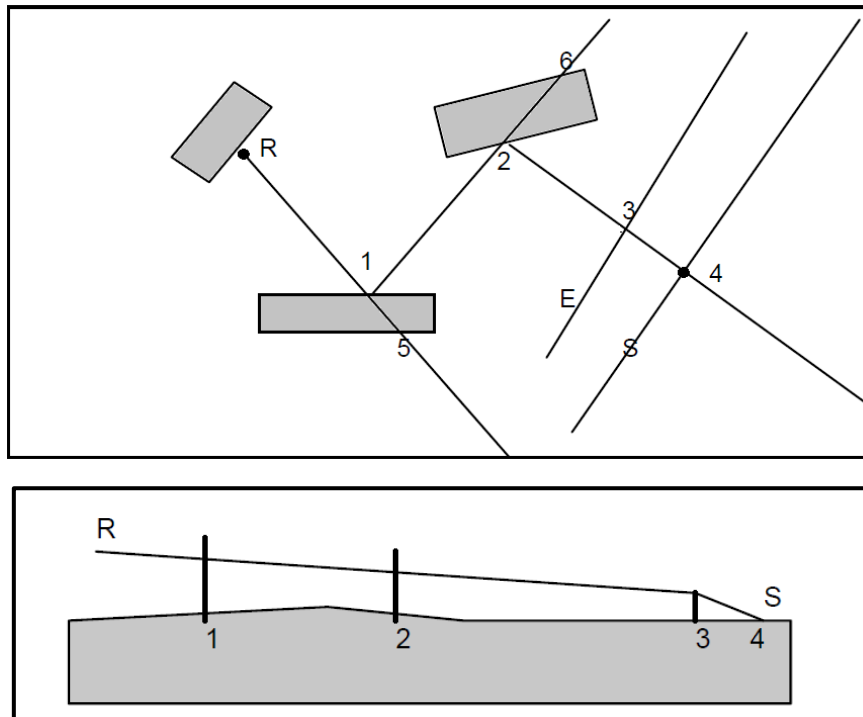


Figure 10 – Recherche des trajets réfléchis et diffractés en 2D et chemin de propagation correspondant dans le plan vertical déplié selon le principe du “paravent chinois”.

Cet algorithme permet de construire rapidement l'arborescence complète des trajets réfléchis et diffractés et de détecter les sources visibles correspondants. La profondeur de cet arbre est un paramètre spécifié par l'utilisateur et peut être ajusté en fonction de la complexité du site.

L'algorithme en mode faisceau est similaire et offre en plus la possibilité de détecter la présence d'arêtes diffractantes aux extrémités des obstacles réfléchissants. Lorsque la diffraction latérale a été activée (en option des paramètres de calcul), l'algorithme génère de nouveaux faisceaux depuis l'arête diffractante afin de détecter des sources dans la zone d'ombre derrière l'obstacle.

A noter: la recherche des trajets diffractés contournant les obstacles a son intérêt pour les sources industrielles protégées par des écrans de faible longueur. Dans le cas de sources étendues (par exemple des lignes sources correspondant à des routes ou des voies ferrées), de tels chemins peuvent être ignorés sans perte de précision.

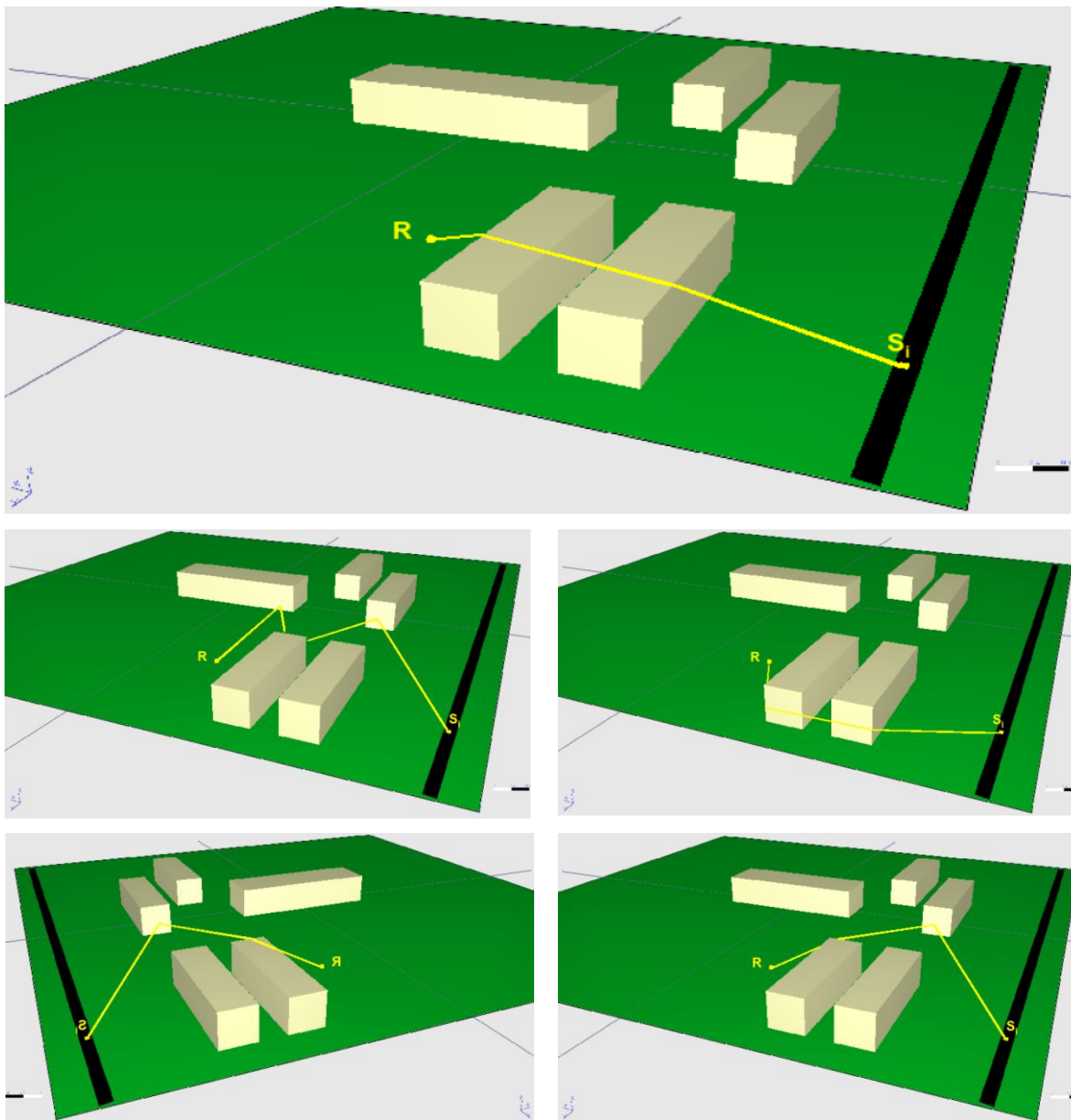


Figure 11 – Construction des chemins de propagation simples et complexes : en haut un chemin de type « direct » passant par-dessus deux bâtiments ; au centre un chemin comportant uniquement des réflexions (à gauche) ou contournant les deux bâtiments (à droite) ; en bas des chemins « complexes » combinant des diffractions par-dessus (à gauche) ou contournant (à droite) un bâtiment avec une réflexion (© SETRA).

Comme illustré dans la Figure 11, l'algorithme de recherche permet de construire tous les types de trajets :

- Le trajet direct, lorsque la source est en vue directe du récepteur.
- Les trajets diffractés par une ou plusieurs arêtes horizontales au sommet des écrans, murs et bâtiments.
- Les trajets réfléchis sur une ou plusieurs faces verticales, générant des sources images à n'importe quel ordre.

- Des trajets diffractés par une ou plusieurs arêtes verticales,
- Des trajets complexes, comportant n'importe quelle combinaison de diffractions et de réflexions multiples.

A noter : la diffraction par des arêtes verticales est disponible uniquement en mode « faisceaux ».

L'algorithme de recherche est spécifié par l'utilisateur en tant que paramètre du calcul, ce qui permet de l'optimisation des calculs en fonction de l'application visée et le temps de calcul.

- La méthode « rayons » correspond à l'algorithme original développé par le CSTB et offre un bon compromis entre exhaustivité de la recherche et temps de calcul. Le calcul des réflexions est typiquement effectué à l'ordre 3.
- La méthode « rayons rapides » favorise les réflexions sur les faces verticales au profit des chemins fortement diffractés par-dessus les obstacles. Cette méthode est particulièrement adaptée à des zones urbaines denses où les réflexions d'ordre supérieurs contribuent significativement au niveau sonore (comme c'est le cas dans les rues en U).
- La méthode des faisceaux effectue une recherche exhaustive des chemins de propagation, là où les méthodes ci-dessus peuvent être assimilés à un échantillonnage de type Monte-Carlo. La méthode offre la plus grande précision, au détriment de temps de calculs plus importants.

II.4.3 - Calculs acoustiques

Chaque trajet géométrique est ensuite transmis au moteur de calcul acoustique afin d'évaluer le niveau sonore partiel, combinant la puissance d'émission de la source et l'atténuation due à la propagation.

MithraSIG supporte plusieurs moteurs de calcul acoustiques, comme illustré dans le tableau ci-dessous. Les méthodes les plus anciennes utilisent un algorithme commun afin de traiter tout type de trajet :

- Pour chaque réflexion ou diffraction par une arête verticale, l'algorithme détermine une atténuation correspondante, prenant en compte la nature et la hauteur de l'obstacle ;
- Puis, le chemin est déplié (comme un paravent chinois) afin d'obtenir un trajet dans un unique plan vertical (donc dans réflexions ni diffractions latérales) comme illustré dans la Figure 11 ci-dessus.
- L'atténuation due au sol et aux obstacles est calculée dans le plan déplié selon l'une des méthodes standards : ISO 9613-2, NMPB (version 1996 ou 2008),

HARMONOISE. La partie spécifique des normes concernant la prise en compte de trajets complexes en 3D est ignorée puisque substituée par l'algorithme commun développé par le CSTB.

Les méthodes plus récentes sont issues des travaux de préparation de la méthode Européenne harmonisée pour la production des cartes stratégiques. En particulier, trois méthodes candidates ont été mises au point adaptations des méthodes ISO 9613-2, NMPB-2008 et HARMONOISE. Ces méthodes sont en général des simplifications des méthodes d'origine, plus rapides mais moins précises, afin de permettre le calcul des cartes stratégiques à grande échelle.

Les moteurs de calcul les plus récents correspondent à l'implémentation de la Directive Européenne 2015/996 (Annexe II de la Directive 2002/49/EC) d'origine et à sa révision qui sera publiée fin 2020.

Méthode	Prise en compte des réflexions et diffractions latérales	Prise en compte des effets de sol et de diffraction par les écrans.
ISO 9613-2	Les chemins complexes comportant un nombre quelconque de réflexions et diffractions latérales sont prises en compte par un algorithme spécifique développé par le CSTB.	Calcul selon la norme ISO 9613-2
NMPB-96		Calcul selon la norme NF XP S31-133:2001
NMPB-2008		Calcul selon la norme NF S31-133
HARMONOISE		Méthode de calcul puissante et précise développée dans les projets Européen Harmonoise et Imagine.
JRC-ISO9613	Implémentation stricte des normes ISO 9613-2 et NF S31-133. Les méthodes ne permettent pas la prise en compte de chemins de propagation complexes comportant à la fois des réflexions sur des obstacles verticaux et des diffractions par des écrans.	
JRC-NMPB		
JRC-HARMO	Implémentation des éléments validés et documentés de la méthode Harmonoise. La méthode ne permet pas le calcul des trajets diffractés latéralement. Le calcul de la correction pour taille finie des obstacles réfléchissant est basée sur la construction des zones de Fresnel.	
CNOSSOS-2015	Implémentation de la Directive Européenne 2015/996 (Annexe II de la Directive 2002/49/EC). Très proche de la méthode française NMPB-2008, la méthode ne permet pas la prise en compte de chemins de propagation complexes.	
CNOSSOS-2020	Révision de la Directive EU-2015/996, en cours de préparation.	

Tableau 1 : Caractéristiques des méthodes de calcul acoustiques implémentées dans Mithra-SIG.

Pour chaque trajet, et quelque soit la méthode de calcul, le niveau sonore correspondant est évaluée selon la formule suivante:

$$L_p = L_w + \Delta L_w + \Delta L_{dir} + \Delta L_{geo} + \Delta L_{air} + \Delta L_{refl} + \Delta L_{dif} + \Delta L_{size} + \Delta L_{excess} + \Delta L_{misc}$$

Les différentes composantes du calcul sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Symbole	Description
Emission sonore en champs libre	
L_w	Puissance de la source
ΔL_w^1	Adaptation de la puissance (champ libre ou hémisphérique)
ΔL_{dir}	Directivité de la source
ΔL_{geo}^2	Divergence géométrique
ΔL_{air}	Absorption dans l'air, calculé selon la norme ISO 9613-1
Atténuations liées aux chemins complexes en 3D	
ΔL_{refl}	Absorption sur les obstacles réfléchissants
ΔL_{dif}	Atténuation due aux diffractions latérales
ΔL_{size}	Correction pour la hauteur finie des obstacles lors des réflexions et diffractions par des arêtes des obstacles verticaux
Atténuation dans le plan de propagation	
ΔL_{excess}	Effet de sol et de diffraction ; selon la méthode ces atténuations sont évaluées pour différentes conditions météorologiques. En général, il y a une forte interaction entre les différents phénomènes et il n'est pas possible de séparer les composantes (comme cela est fait dans certains normes plus anciens).
Autres atténuations	
ΔL_{misc}	Le moteur de calcul autorise l'utilisation d'extensions afin d'aller plus loin que les calculs prescrits dans les normes. De tels extensions sont développées par le CSTB dans le cadre de divers projets de R&D et

¹ Mithra-SIG distingue les sources caractérisées selon la méthode hémisphérique (au-dessus d'un plan horizontal réfléchissant) ou selon la méthode en champ libre (par exemple en salle anéchoïque). Pour une source proche du sol, la différence entre les deux méthodes est de l'ordre de 3 dB.

² Pour une source linéique, Mithra-SIG la divergence se calcule comme l'intégrale de la divergence en $1/d^2$ sur la longueur du segment de source intersecté par le faisceau associé à chaque rayon.

	permettent entre autres de prendre en compte les interactions entre les trains et les écrans proches des voies ferrées, les écrans inclinés ou de forme complexe, les couronnements d'écrans, les réflexions diffuses, la diffusion du son par des zones encombrées...
--	--

Tableau 2 : Composantes de l'évaluation des niveaux sonores dans le moteur de calcul acoustique.

Pour chaque trajet, le niveau sonore, en moyenne sur une période suffisamment longue, est évaluée en prenant en compte la fréquence d'occurrence des conditions de propagation favorables³ selon la formule proposée par la méthode française et reprise dans le cadre de la mise en oeuvre de la Directive 2002/49/EC :

$$L_{eq,T} = 10 \lg \left(\frac{p_{FAV}}{100} 10^{L_{p,FAV}/10} + \left(1 - \frac{p_{FAV}}{100} \right) 10^{L_{p,HOM}/10} \right)$$

Où p_{FAV} représente la fréquence d'occurrence des conditions favorables dans la direction de propagation entre la source et le récepteur et $L_{p,HOM}$ et $L_{p,FAV}$ les niveaux sonores évalués pour des conditions de propagation neutres et favorables respectivement.

Le niveau sonore global au point de réception est évalué en sommant les niveaux sonores partiels pour chaque trajet.

MithraSIG permet, en partant d'un seul tir de rayons, de calculer les niveaux sonores pour différents scénarios temporels. Chaque scénario correspond à des conditions d'émission des sources et de propagation du son particulières. Le calcul des cartes stratégiques, au sens de la Directive 2002/49/EC se base sur l'exploitation de trois scénarios distincts, correspondants au période de jour (12 heures), soirée (4 heures) et nuit (8 heures).

II.5 - Post-traitements

MithraSIG permet de créer à la fois des rendus vectoriels et des rendus raster avec un outil de création de cartes extrêmement élaboré. De simples cases à cocher permettent de définir tous les paramètres d'une carte : indicateur, sources, fréquences, palette de couleurs, type de rendu, précision. La visualisation de la carte évolue en temps-réel à la modification de ces paramètres. De ce fait, il est simple de paramétrer et créer sa carte rapidement.

³ Les conditions favorables correspondent à des niveaux sonores plus forts qu'en moyenne dus à la propagation du son par vent portant (dans la journée) et/ou en présence de gradient de température inversée (de nuit).

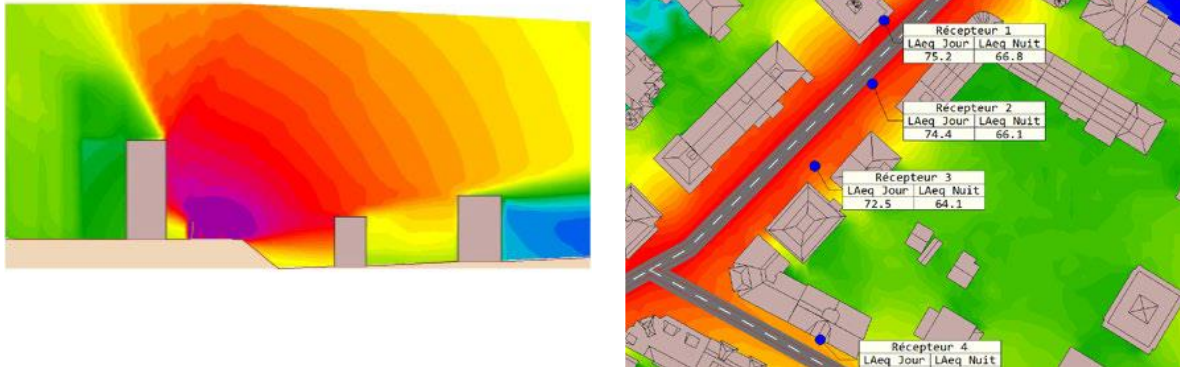


Figure 12 – Présentation des résultats sous forme de cartes horizontales et verticales

II.5.1 - La directive européenne

MithraSIG est un logiciel reprenant toutes les spécificités des cartes stratégiques notamment la Directive Européenne 2002/49/CE. Par exemple, les récepteurs des cartes horizontales sont par défaut à 4 m de hauteur. De même, la dernière réflexion sur la façade est supprimée pour le calcul L_{den} et L_{night} .

Les calculs sont particulièrement adaptés aux grandes zones (villes) et aux grandes infrastructures.

Les analyses permettent entre autres les calculs du nombre de bâtiments et de populations exposées conforme à la Directive Européenne.

II.5.2 - Exposition des populations

MithraSIG permet de déterminer le nombre de bâtiments ainsi que le nombre d'habitants exposés à un certain niveau sonore. Ces niveaux sonores sont automatiquement définis à partir de la thématique courante et classés par intervalles.

Les populations exposées sont calculées en parcourant les résultats de tous les récepteurs associés aux bâtiments (en prenant en compte les paramètres de la carte). Un tableau résume ensuite la population en classant les bâtiments par intervalles de niveaux sonores.

Ce calcul peut se faire au choix pour les bâtiments sensibles ou pour les bâtiments non sensibles. Dans les bâtiments sensibles, sont pris en compte les bâtiments d'habitation (individuel et collectif), d'éducation, et de santé. Dans les bâtiments non sensibles, sont pris en compte les bâtiments administratifs, bureau, industriel/agricole, autres.

II.5.3 - Carte de différences, émergence

MithraSIG permet la création de cartes différentielles (avant/après implantation d'une infrastructure, augmentation/diminution du trafic ou de la vitesse, etc.).

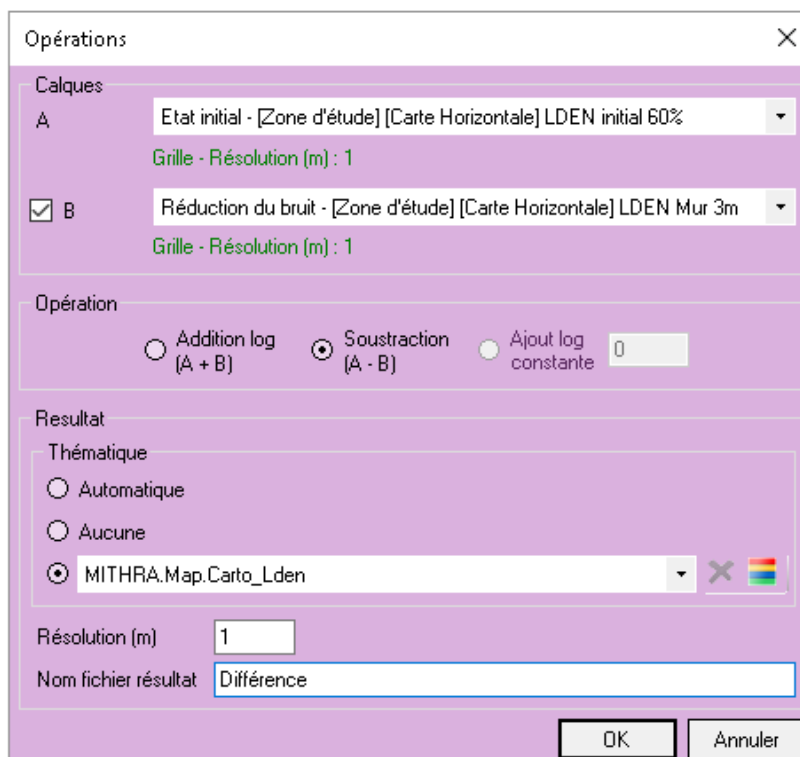


Figure 13 - Calcul d'une différence entre 2 variantes de projet

II.5.4 - Export multiple

MithraSIG est basé sur un SIG, il bénéficie de nombreuses fonctions d'export et de diffusion des cartes produites sous diverses formes, telles que :

- PDF dynamiques avec calques, attributs et géoréférencement.
- KMZ qui permet entre autres la visualisation sous Google Earth™.
- Export vers des logiciels de survol temps réel de maquettes virtuelles.
- Plus de 50 formats d'export, vectoriels et rasters (SHP, TAB, ECW, JPEG, TIFF, BIL, etc.).



Figure 14 – Export des résultats vers Google Earth TM

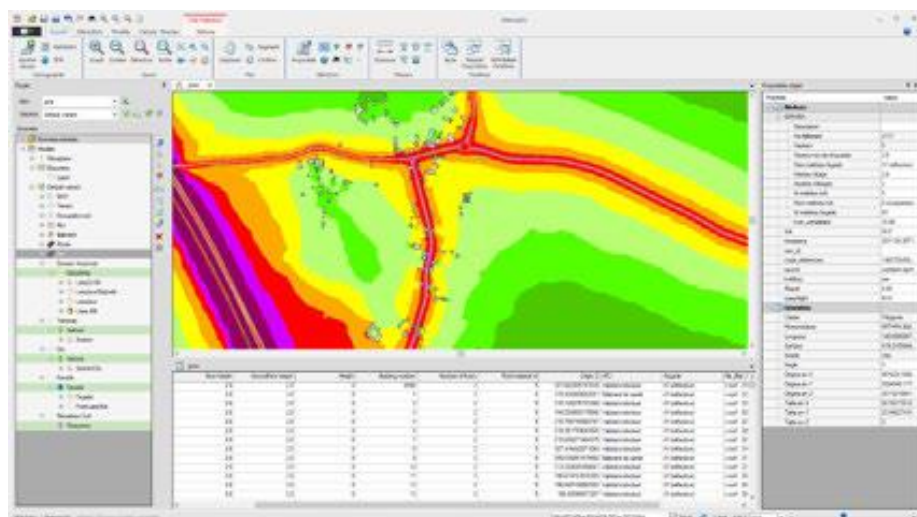


Figure 15 – Export des résultats sous forme de tableaux

III - Modélisation des activités portuaires

La modélisation acoustique des activités portuaires doit tenir compte des différents modes opératoire tels que :

- l'entrée et la sortie des navires dans port, y compris les manœuvres de mise à quai ;
- l'attente du navire à quai entre deux traversées ;
- les opérations de chargement et de déchargement.

Eu égard le temps nécessaire pour l'entrée et la sortie du port, les experts estiment que ce mode de fonctionnement apporte une faible contribution aux niveaux d'exposition exprimés en moyenne annuelle. Toutefois, ces opérations peuvent générer une gêne locale et limitée dans le temps. Si besoin, de tels opérations peuvent être modélisées avec les outils existants en considérant une source ponctuelle de puissance connue en mouvement à vitesse constante sur une trajectoire définie.

Les activités de chargement et de déchargement peuvent être assimilées à des activités industrielles et modélisées en tant que tel avec des outils existants (voir ci-après). Un important travail a été effectué lors de différents projets Européens il ne semblait pas opportun de dupliquer ce travail dans le projet en cours.

On s'intéresse donc en particulier aux sources de bruit d'un navire à quai, qu'il soit en simple attente entre deux missions ou en phase de chargement/déchargement. Puisque cette mode peut durer plusieurs heures, voire plusieurs jours, il génère un bruit d'exposition quasiment constant qui peut générer de la gêne prolongée, en particulier pour les ports qui se situent proche ou intégrés dans des zones urbaines.

Les principes d'une telle modélisation ont été discutés lors d'une première réunion technique à Grenoble en janvier 2020, en présence de représentants d'UNIGE, CSTB, GEOMOD. Cette réunion a permis la mise en commun de l'expertise en matière de modélisation du trafic naval (UNIGE, GEOMOD) et l'expertise en modélisation acoustique (UNIGE, CSTB). Cette réflexion commune a permis d'établir le cahier des charges pour la réalisation de la fonctionnalité portuaire dans le logiciel MithraSIG.

La faisabilité et les principes de modélisation ont été testés par le CSTB dans le cadre du projet Décibel. Il s'est avéré que la modélisation manuelle des navires était pertinente en termes de résultats acoustiques et réalisable avec les outils disponibles. Toutefois, une modélisation manuelle s'est avérée peu commode et gourmand en temps. L'objectif fixé pour le projet Report a été d'automatiser une telle modélisation et de simplifier la tâche

au point de la rendre accessible à l'ensemble des utilisateurs. A notre connaissance, une telle fonctionnalité n'est disponible dans aucun autre logiciel de modélisation acoustique et/ou dans les outils de production des cartes d'exposition conformes aux exigences de la Directive Européenne.

III.1 - Modélisation des navires

Un objet « Navire » est une source acoustique représentée par un ensemble d'objets (structure géométrique du navire et sources sonores), regroupés dans un objet de type Groupe.

Dans ce document, on parle de Navire plutôt que de Bateau car on souhaite modéliser les gros objets de navigation (plus de 25 m de longueur) et exclure les bateaux de plaisance et les petits bateaux de pêche.

III.1.1 - Différents types de navires

Au commencement du projet, nous avons cherché à connaître les détails et les caractéristiques des différents types de navires. Nous avons donc réalisé des recherches sur les variabilités entre navires, que ce soit en termes de longueur, de tonnage, de positionnement de la superstructure, de positionnement de la cheminée ou bien simplement de forme.

Le but étant de déterminer des grandes règles nous permettant de définir les catégories de navire et les paramètres des navires que nous allons implémenter.

Nos recherches nous ont permis de constater qu'il existait une grande diversité entre les différents types de navire, mais que l'on pouvait cependant déterminer des points communs.

Les images suivantes permettent de s'en convaincre.

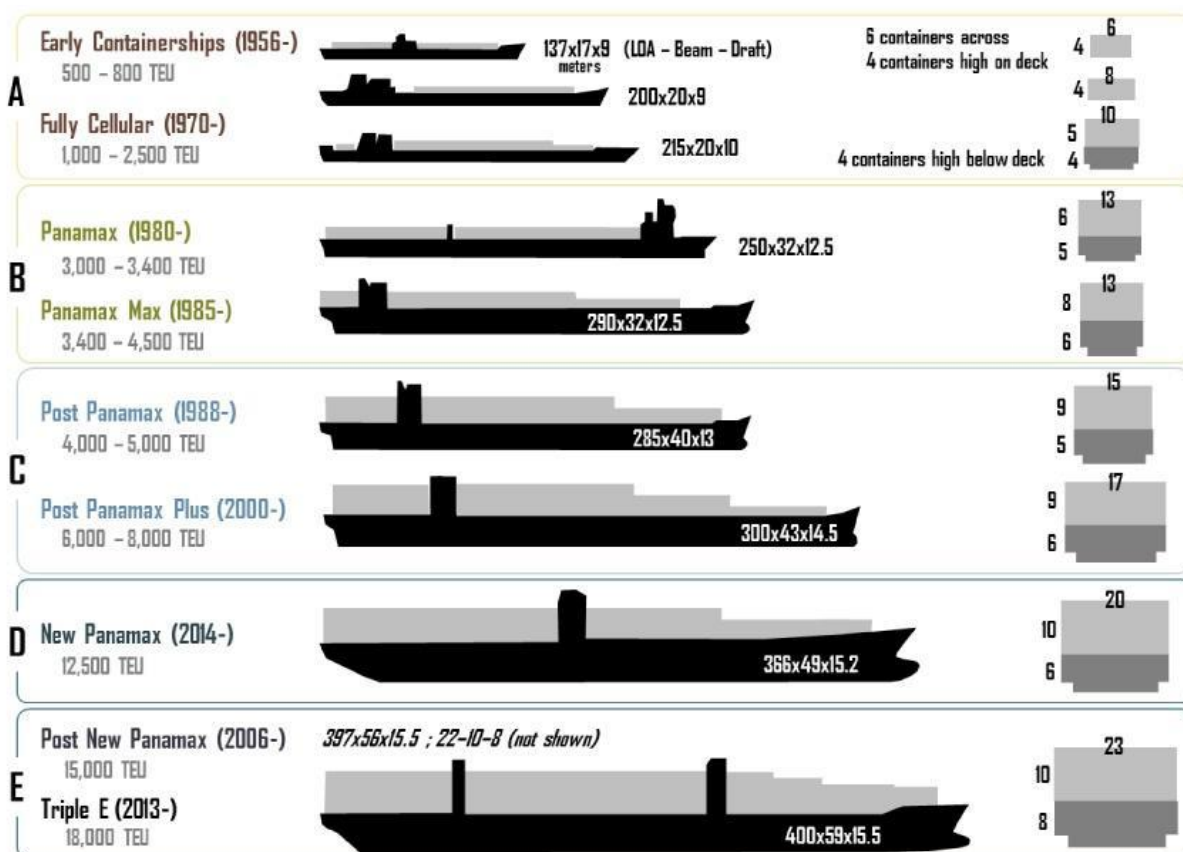


Figure 16 - Classification des porte-conteneurs (source OCTOBRE 2015 - JEAN-PAUL RODRIGUE, HOFSTRA UNIVERSITY, NEW YORK)

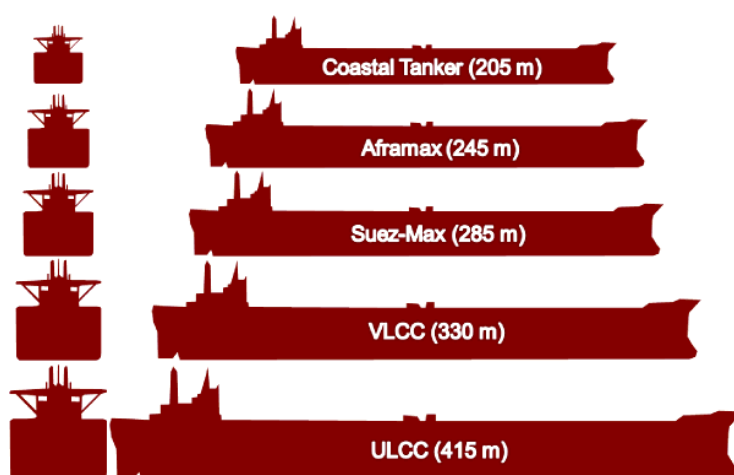


Figure 17 - Classification des pétroliers (tankers) (source Theo Notteboom, Athanasios Pallis and Jean-Paul Rodrigue (2020) Port Economics, Management and Policy, New York: Routledge.)

Ces navires sont à la fois extrêmement différents d'un navire à l'autre et de tailles variables⁴.

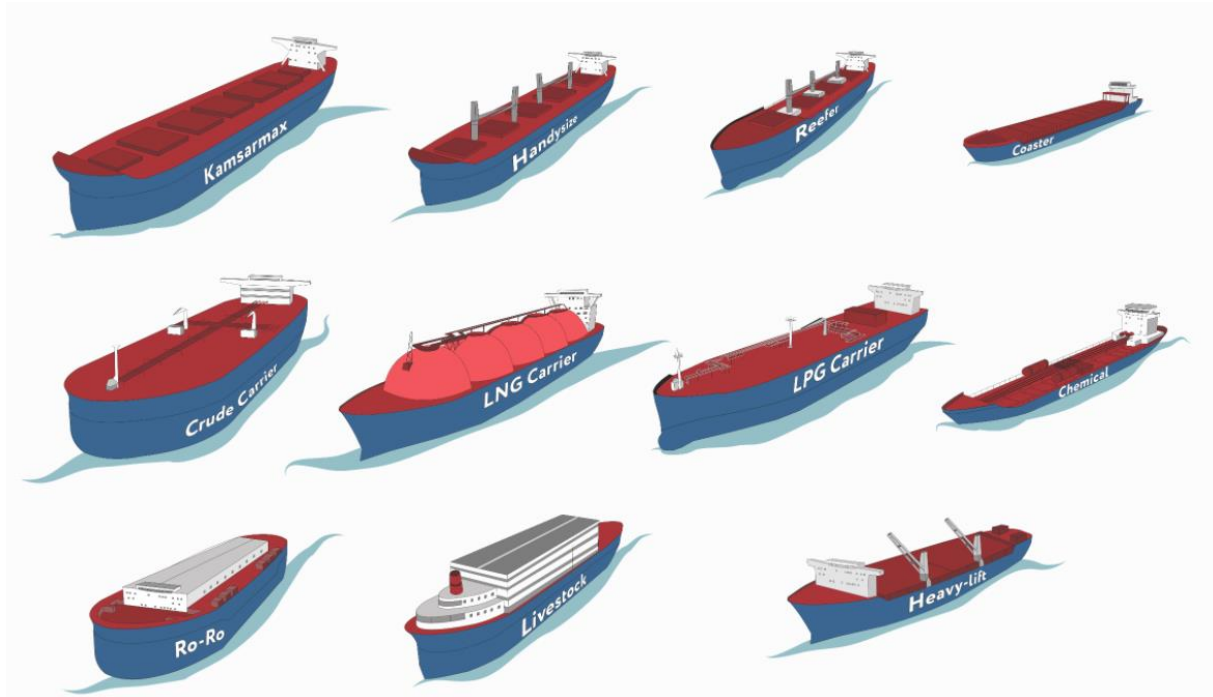


Figure 18 - Aperçu des types de cargo et de navires citernes.

En savoir plus : <https://www.opensea.pro/blog/ships-types-and-sizes>

On constate également que l'évolution va vers des navires de plus en plus gros : ISEMAR, Les nouvelles échelles du transport maritime, Janvier 2007: <https://www.isemar.fr/wp-content/uploads/2016/11/note-de-synthese-isemar-91.pdf>

⁴ <https://www.opensea.pro/blog/ships-types-and-sizes>

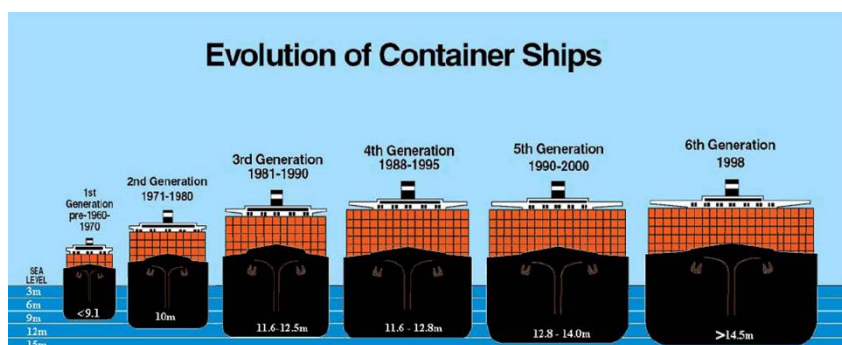


Figure 19 - Caractéristiques des porte-conteneurs par année de mise en service (source Vessel Tacking, Ship and Container Tracking)

Dans le cas des porte-conteneurs, les informations de tonnage, de largeur et de longueur de chaque navire sont librement accessibles grâce aux AIS (Automatic Identification System⁵).

Voici quelques exemples de navire de passagers :



Pascal Paoli

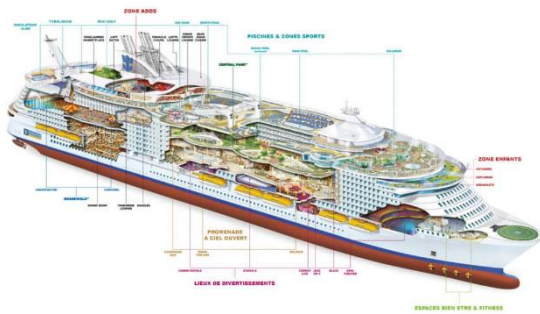
Longueur 176 m
 Maître-bau 30,50 m
 Tirant d'eau 6,50 m
 Tirant d'air 42 m



Mega Express

Longueur 176,38 m
 Maître-bau 24,82 m

⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_d%27identification_automatique



Oasis Of the Seas

Longueur 360 m

Maître-bau 47 m

Tirant d'eau 9,1 m

Tirant d'air 65 m

Costa Pacifica

Longueur 290,2 m

Maître-bau 35,5 m

Tirant d'eau 8,30 m

Tirant d'air 70 m

Sur ces navires de passager, la forme est relativement identique, la principale différence restant la position de la cheminée.

Les catégories de navires suivantes ont donc été étudiées pour faciliter la conception et la configuration des navires :

- Porte-conteneurs
- Cargaison
- Pétroliers
- Traversier
- Bateau de croisière

Deux catégories de navires sont actuellement retenues : les porte-conteneurs et les navires de passagers.

Les porte-conteneurs regroupent les pétroliers (tankers), les porte-conteneurs et les vraquiers.

Les navires de passagers regroupent les ferries et les navires de croisière.

D'autres catégories pourraient être envisagées ultérieurement, notamment en s'inspirant des types de navires proposés par Marine Traffic⁶.

⁶ <https://www.marinetraffic.com/> and International Maritime Organization

III.1.2 - Principes acoustiques

Une première étape consiste à identifier les principales sources de bruit liées aux différents types de navires.

Chaque mécanisme de génération du bruit (moteur principal, moteur auxiliaire, ventilation,...) est alors associé à une source élémentaire particulière caractérisé par :

- sa position,
- sa directivité,
- son spectre de puissance.

Ce principe a été mis en œuvre par le CSTB dans le projet Décibel pour les ferries. Dans le projet REPORT, les connaissances acquises par le CSTB ont été combiné avec l'expertise d'UNIGE afin de le généraliser à l'ensemble des navires.

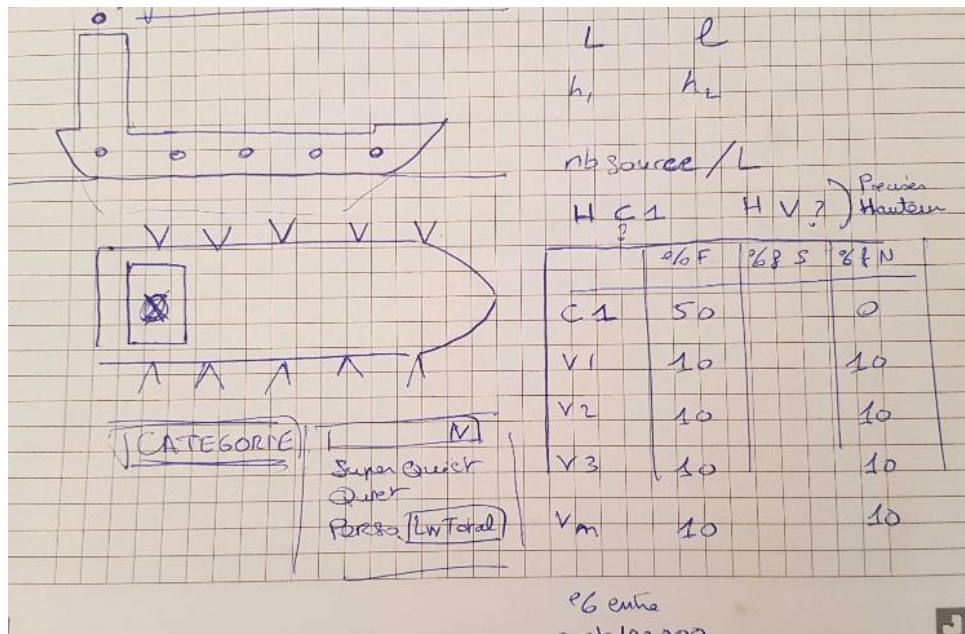


Figure 20 - Principes de modélisation proposés par les experts lors de la réunion technique

Contrairement à d'autres sources, les navires représentent des objets de grande taille et leur forme géométrique ne peut être ignorée dans une modélisation réaliste. En effet, un navire représente un grand « bâtiment » flottant qui modifie significativement le milieu de propagation du son :

- Les flancs verticaux des navires représentent de grandes surfaces réfléchissantes, en particulier, lorsque le navire est à quai des réflexions multiples entre le navire et des obstacles fixes à terre peuvent se produire.
- La superstructure du navire peut masquer certaines sources, que celles-ci soient liées aux navires ou associées à des activités sur terre.

Il convient donc de prendre en compte la géométrie du navire dans la détection des chemins de propagation de type simple (réflexion ou diffraction) ou complexe.

Afin de simplifier la tâche de l'utilisateur, le développement d'un certain nombre d'outils complémentaires est fortement souhaité, comme par exemple :

- Lorsque la localisation exacte des sources n'est pas accessible, la modélisation devrait proposer une distribution spatiale plausible en fonction du type de navire.
- Lorsque l'utilisateur n'a pas le moyen d'effectuer des mesures précises, il devrait être possible d'estimer de façon simple la puissance acoustique des navires à partir d'une base de données et/ou une classification acoustique existante, disponible sur internet. Une telle fonctionnalité devrait permettre une exploitation de l'outil à faible coûts pour la production des cartes de bruit.
- Afin de permettre la réalisation d'études particulières (par exemple dans le cadre de mise au point de plans d'action locaux), l'outil doit permettre l'exploitation de données mesurées sur des navires particuliers.

III.1.3 - Le cahier des charges pour la modélisation des navires dans MithraSIG

Après étude des différents types de navires, nous avons essayé de rendre simple et précise la modélisation d'un navire dans MithraSIG. Nous sommes passés par deux phases de réflexion.

Une première réflexion nous a mené à définir les caractéristiques géométriques et acoustique des navires. Afin de couvrir un large spectre de sources, les efforts ont été concentrés sur deux types de navires : les porte-conteneurs et celles des navires de passagers. Il va de soi que la méthodologie peut d'étendre à d'autres catégories de navires comme les tankers ou les vraquiers.

III.1.4 - Porte-conteneurs

➤ **Caractéristiques géométriques**

Dans le cas d'un Porte-conteneurs, le navire est dessiné sous la forme d'un groupe d'objets. Ce groupe est composé des éléments suivants :

- Un objet surfacique (Objet obstacle à la propagation) correspondant à la partie inférieure du navire. Cet objet a sa propre hauteur, correspondant à la hauteur entre la ligne de flottaison et le pont du navire. Ses dimensions (longueur, largeur) sont celles du navire.

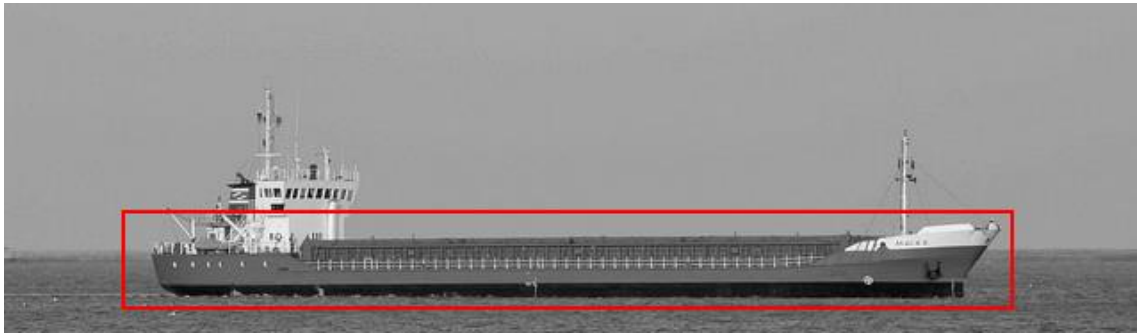


Figure 21 - Modélisation géométrique du volume principal

- Un objet surfacique (Objet obstacle à la propagation) correspondant à la partie supérieure du navire. Il sera placé à une altitude correspondant au pont du navire et aura sa propre hauteur. Sa largeur par défaut est celle du navire moins 2 m de chaque côté. Sa longueur est égale au quart de la longueur du navire, avec un maximum de 40 m. Cet objet est placé 5 m avant la fin du navire.



Figure 22 - modélisation superstructure

Un navire est caractérisé par son tirant d'eau. A partir du tirant d'eau, on peut estimer les 2 dimensions suivantes :

- Hauteur de la partie basse = $0.5 \times \text{Tirant d'eau}$
- Hauteur de la partie haute = Tirant d'eau

On peut constater que dans le cas présent, les dimensions de la superstructure sont déterminées automatiquement à partir des autres caractéristiques du navire et qu'un objet ne représente la cheminée ou les conteneurs.

➤ **Caractéristiques acoustiques**

L'impact acoustique du navire est modélisé par un ensemble d'objets ponctuels, représentant les sources de bruit du navire :

- 6 sources ponctuelles de chaque côté du porte-conteneurs, nommées V1, V2, V3, V4, V5 et V6 dans la figure ci-dessous

- 1 source ponctuelle représentant les cheminées, nommée C1.
 Dans le cas d'un porte-conteneurs, les sources seront placées de la manière suivante :

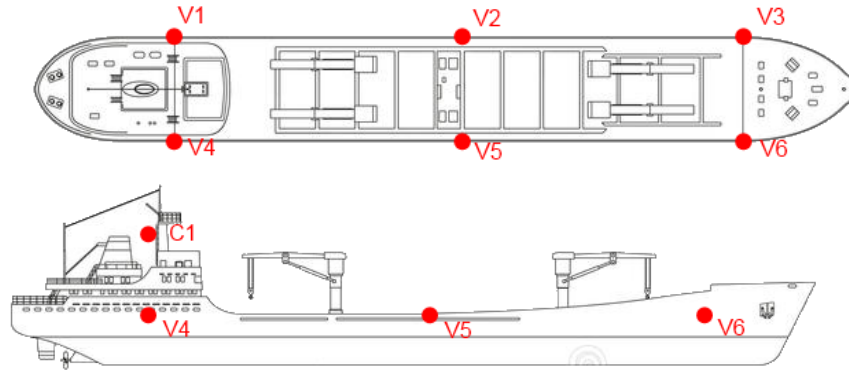


Figure 23 - modélisation des sources associées aux navires cargos

Concrètement, les sources sont placées ainsi :

- V1, V4 : (gauche et droit), le long du navire au milieu de la partie haute, à une hauteur définie par l' utilisateur.
- V2, V5 : (gauche et droit), le long du navire au milieu du navire, à une hauteur définie par l' utilisateur.
- V3, V6 : (gauche et droit), le long du navire à 10 % de sa longueur à partir de l' avant du navire, à une hauteur définie par l' utilisateur.
- C1 : Au centre de la partie haute du navire et à une altitude égale à l' altitude du haut de la partie haute du navire + 5 m.

Les directivités des sources sont :

- V1, V2, V3, V4, V5, V6 : héli-directionnelle,
- C1 : omnidirectionnelle.

La position et le nombre de sources est fixe. Pour déterminer la puissance des sources, l'utilisateur peut spécifier un spectre sur chacune des sources.

➤ Représentation graphique

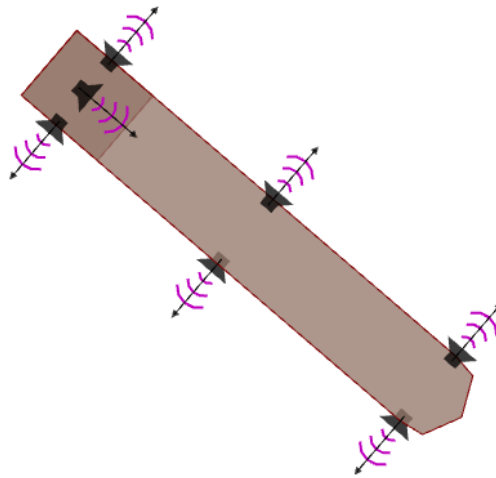


Figure 24 - Représentation graphique des porte-conteneurs

III.1.5 - Navires de passagers

➤ Caractéristiques géométriques

Dans le cas d'un Navire de passagers, le navire est dessiné sous la forme d'un groupe d'objets. Ce groupe est composé des éléments suivants :

- Un objet surfacique (Objet obstacle à la propagation) correspondant à la partie inférieure du navire. Cet objet a sa propre hauteur, correspondant à la hauteur entre la ligne de flottaison et le pont du navire. Ses dimensions (longueur et largeur) sont celles du navire.



Figure 25 - Modélisation géométrique des navires de passagers

- Un objet surfacique (Objet obstacle à la propagation) correspondant à la partie supérieure du navire. Il sera placé à une altitude correspondant au pont du navire et aura sa propre hauteur. Ses dimensions (longueur et largeur) sont à définir par l'utilisateur.

- La position de la cheminée. Cette position est très variable celle-ci pouvant être n'importe où sur le navire (à l'arrière, au centre, etc.).

➤ Caractéristiques acoustiques

L'impact acoustique du navire est modélisé par un ensemble d'objets ponctuels, représentant les sources de bruit du navire :

- 6 sources ponctuelles de chaque côté du navire, nommées V1, V2, V3, V4, V5 et V6, représentant les ventilations, dans le schéma ci-dessous.
- 1 source ponctuelle représentant les cheminées, nommée C1.

Dans le cas d'un navire de passagers, les sources seront placées de la manière suivante :

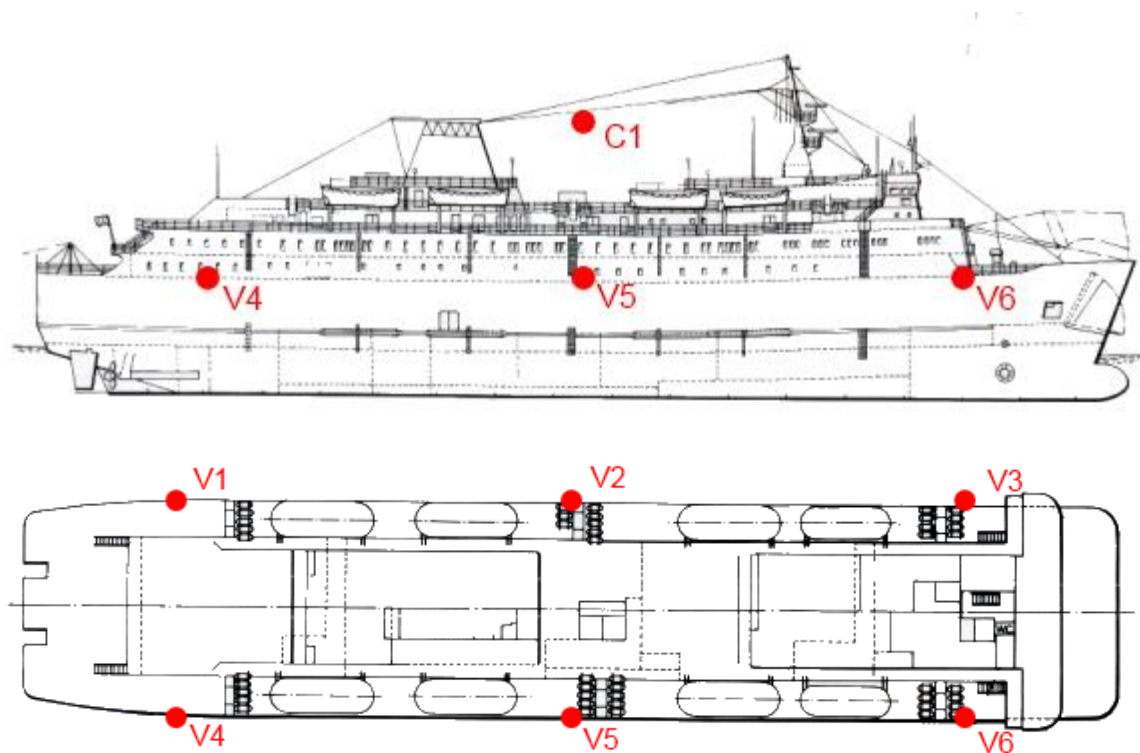


Figure 26 - Modélisation acoustique des navires de passagers.

Concrètement, les sources sont placées ainsi :

- V1, V4 : (gauche et droit), le long du navire à 20 % de sa longueur à partir de l'arrière du navire, à une hauteur égale à celle du pont.
- V2, V5 : (gauche et droit), le long du navire au milieu du navire, à une altitude égale à celle du pont.
- V3, V6 : (gauche et droit), le long du navire à 20 % de sa longueur à partir de l'avant du navire, à une hauteur égale à celle du pont.
- C1 : Sur la partie haute du navire et à une altitude égale à l'altitude du haut de la partie haute du navire + 5 m. La position de la source étant très variable, ce sera un paramètre de saisie.

Les directivités des sources sont :

- V1, V2, V3, V4, V5, V6 : héli-directionnelle,
- C1 : omnidirectionnelle.

La position et le nombre de sources est fixe. Pour déterminer la puissance des sources, l'utilisateur peut spécifier un spectre sur chacune des sources.

➤ Représentation graphique

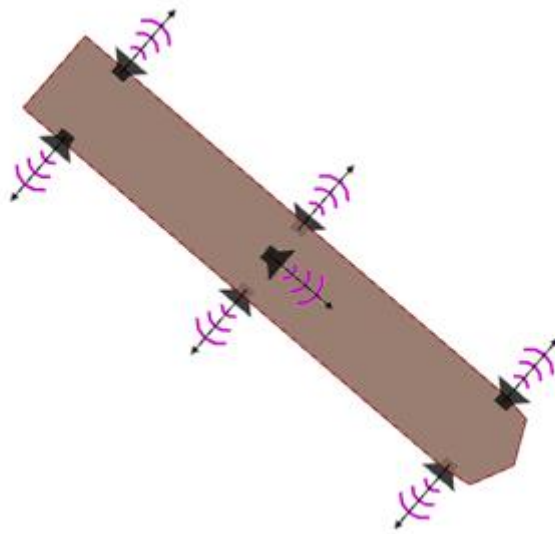
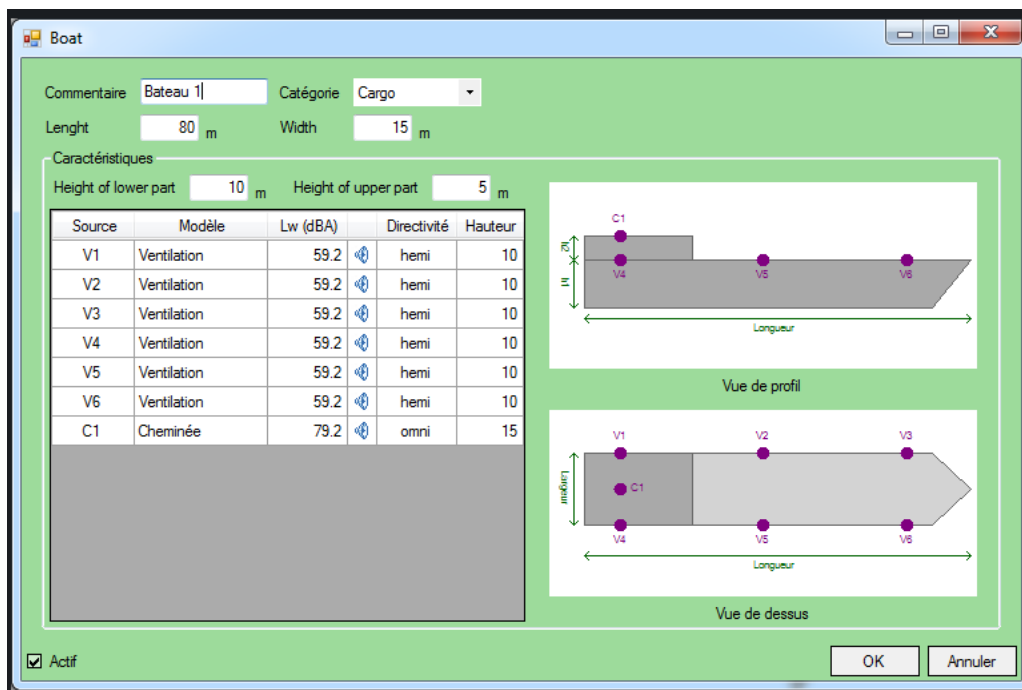


Figure 27 - Représentation graphique des navires de passagers

III.1.6 - Prototypage des interfaces

A partir de ces études, un premier prototype du module port a été livré aux partenaires du projet.

L'interface ci-dessous représente la fenêtre de saisie des propriétés : dimensions, positionnement et configuration des sources de la première version du module port.



Boat

Commentaire Catégorie

Lenght m Width m

Caractéristiques

Height of lower part m Height of upper part m

Source	Modèle	Lw (dBA)	Directivité	Hauteur
V1	Ventilation	59.2	hemi	10
V2	Ventilation	59.2	hemi	10
V3	Ventilation	59.2	hemi	10
V4	Ventilation	59.2	hemi	10
V5	Ventilation	59.2	hemi	10
V6	Ventilation	59.2	hemi	10
C1	Cheminée	79.2	omni	15

☒ Actif

OK Annuler

Figure 28 - Prototypage de l'écran de saisie pour les porte-conteneurs

III.1.7 - Modélisation et interface définitives

Lors d'une deuxième phase, nous avons cherché à améliorer les possibilités de modélisation géométriques et acoustiques du navire. La représentation graphique de chaque catégorie de navire a également été repensée. La version actuelle de MithraSIG est le résultat de cette deuxième phase de réflexion.

III.1.8 - Porte-conteneurs

➤ Caractéristiques géométriques

Ship

Geometry

Acoustic

Comment

Ship 1

Category

Cargo ship

Length

96.8 m

Breadth

15 m

Height of the hull (h1)

5 m

Height of superstructure (h2)

10 m

Offset of the superstructure (s1)

2 m

Length of the superstructure (s2)

10 m

Height of sources on the sides

5 m

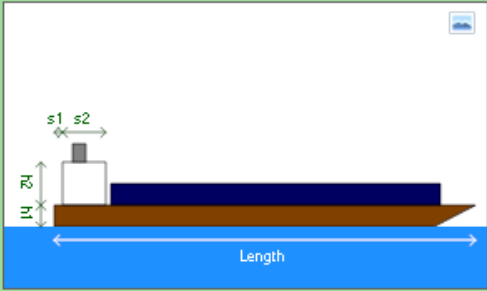
Offset of the funnel

4 m

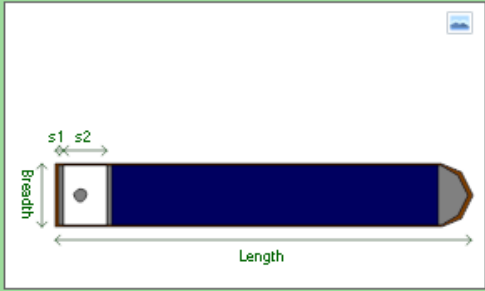
☒ Containers

Total height of containers

5 m



Profile view



Top view

☒ Active

OK

Cancel

Le porte-conteneurs possède désormais les caractéristiques géométriques suivantes :

- Longueur : Longueur du navire
- Largeur : Largeur du navire
- Hauteur de la coque : Hauteur correspondant à hauteur entre le bas de la partie visible du navire jusqu'au pont. La partie immergée n'est pas modélisée.
- Hauteur de la superstructure : Hauteur correspondant à la hauteur entre le pont et le haut de la superstructure
- Décalage de la superstructure : Distance entre la poupe et l'arrière de la superstructure (lorsqu'on regarde vers l'avant du navire)
- Longueur de la superstructure
- Hauteur des sources latérales : Hauteur à laquelle les sources situées sur les flancs du navire vont être positionnées.
- Décalage de la cheminée : Distance entre l'arrière de la superstructure et l'arrière de la cheminée (lorsqu'on regarde vers l'avant du navire)
- Présence de conteneurs : Indique si le navire possède des conteneurs
- Hauteur totale des conteneurs : Hauteur maximale entre le pont et le haut des conteneurs du navire

On pourra noter que la longueur de la cheminée est déterminée automatiquement.

➤ Caractéristiques acoustiques

Pour déterminer l'impact acoustique du navire, on découpe le navire en plusieurs zones, nommées "emplacements". Sur ces emplacements, l'utilisateur peut ajouter des sources ponctuelles à partir de la base de données des modèles de référence.

Au sein même de ces emplacements, l'utilisateur peut également spécifier plus précisément où se trouve la source sur l'emplacement.

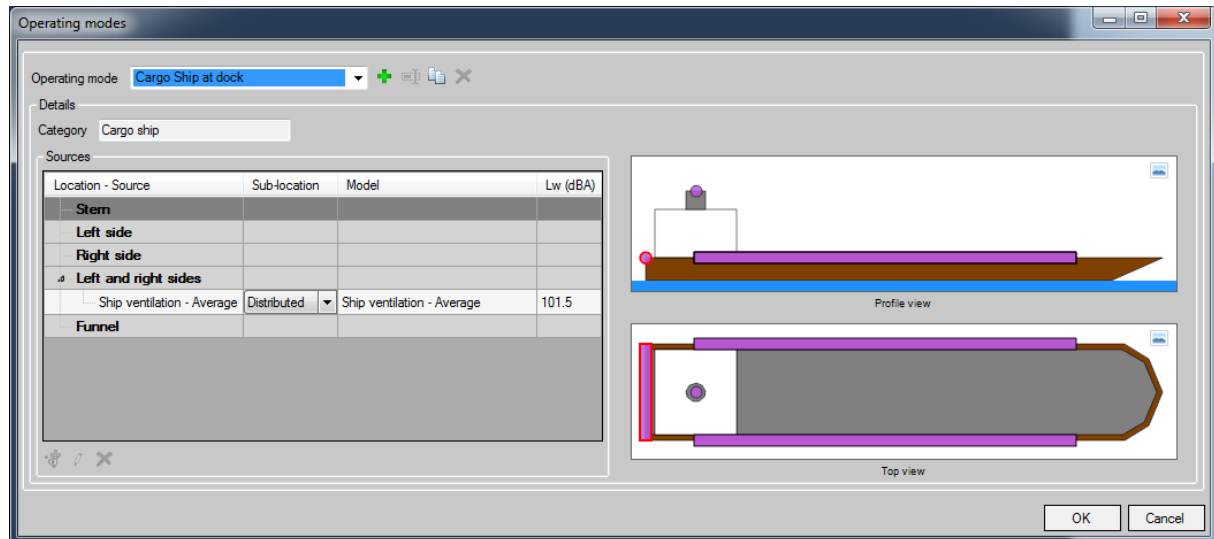


Figure 29 - Interface des modes de fonctionnement

Dans le cas d'un porte-conteneurs, les emplacements suivants sont disponibles :

- Poupe du navire : Source positionnée à l'arrière du navire
- Côté gauche du navire : Source positionnée sur le flanc gauche du navire
- Côté droit du navire : Source positionnée sur le flanc droit du navire
- Côté gauche et côté droit du navire : Pour ajouter une source sur les deux côtés du navires. Cela équivaut à l'ajouter dans les deux emplacements précédents
- Cheminée : Source positionnée sur la cheminée

La hauteur des sources est définie en fonction de l'emplacement où elles se trouvent.

Si plusieurs sources sont présentes sur un emplacement, l'impact acoustique de cet emplacement est déterminée en prenant la somme des puissances de ces sources.

➤ Représentation graphique

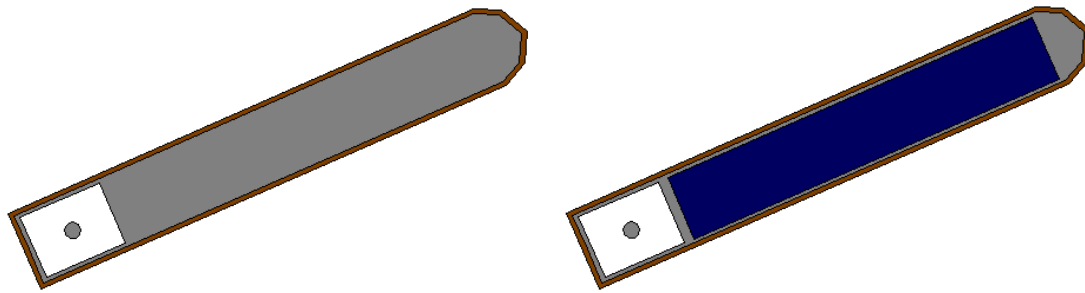


Figure 30 - Représentation graphique des porte-conteneurs (sans conteneurs et avec des conteneurs)

III.1.9 - Navires de passagers

➤ Caractéristiques géométriques

Figure 31 - Caractéristiques géométrique d'un navire de passagers

Le navire de passagers possède désormais les caractéristiques géométriques suivantes :

- Longueur : Longueur du navire
- Largeur : Largeur du navire
- Hauteur de la coque : Hauteur correspondant à hauteur entre le bas de la partie visible du navire jusqu'au pont. La partie immergée n'est pas modélisée.

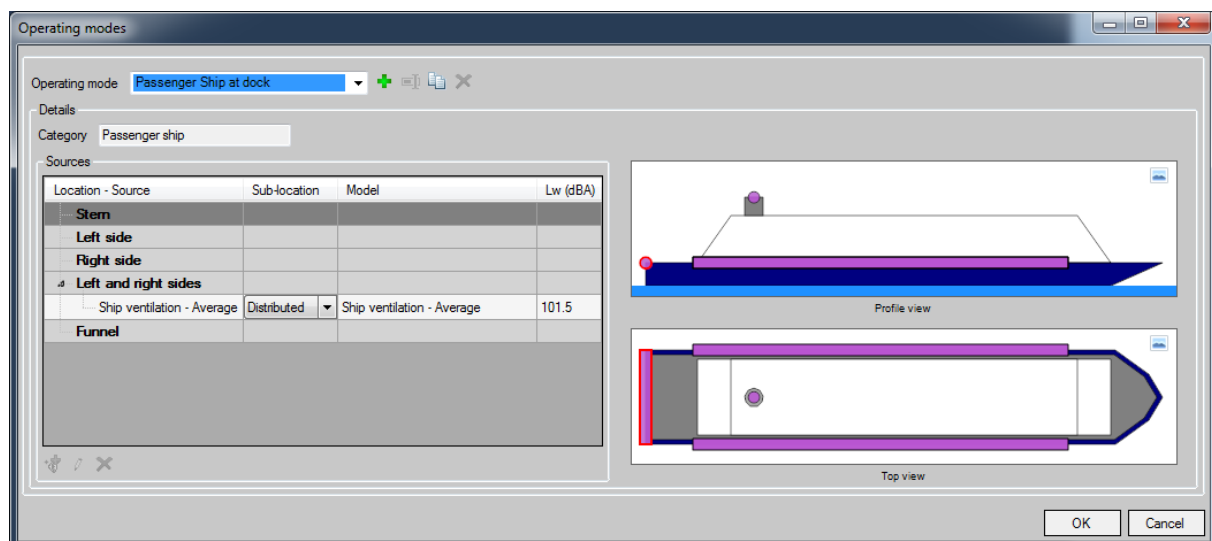
- Hauteur de la superstructure : Hauteur correspondant à la hauteur entre le pont et le haut de la superstructure
- Hauteur des sources latérales : Hauteur à laquelle les sources situées sur les flancs du navire vont être positionnées.
- Décalage de la cheminée : Distance entre l'arrière de la superstructure et l'arrière de la cheminée (lorsqu'on regarde vers l'avant du navire)

On pourra noter que la longueur et la position de la superstructure sont déterminées automatiquement, ainsi que la longueur de la cheminée.

➤ Caractéristiques acoustiques

Pour déterminer l'impact acoustique du navire, on découpe le navire en plusieurs zones, nommées "emplacements". Sur ces emplacements, l'utilisateur peut ajouter des sources ponctuelles à partir de la base de données des modèles de référence.

Au sein même de ces emplacements, l'utilisateur peut également spécifier plus précisément où se trouve la source sur l'emplacement.



Dans le cas d'un navire de passagers, les emplacements suivants sont disponibles :

- Poupe du navire : Source positionnée à l'arrière du navire
- Côté gauche du navire : Source positionnée sur le flanc gauche du navire
- Côté droit du navire : Source positionnée sur le flanc droit du navire
- Côté gauche et côté droit du navire : Pour ajouter une source sur les deux côtés du navires. Cela équivaut à l'ajouter dans les deux emplacements précédents
- Cheminée : Source positionnée sur la cheminée

La hauteur des sources est définie en fonction de l'emplacement où elles se trouvent.

Si plusieurs sources sont présentes sur un emplacement, l'impact acoustique de cet emplacement est déterminée en prenant la somme des puissances de ces sources.

➤ Représentation graphique

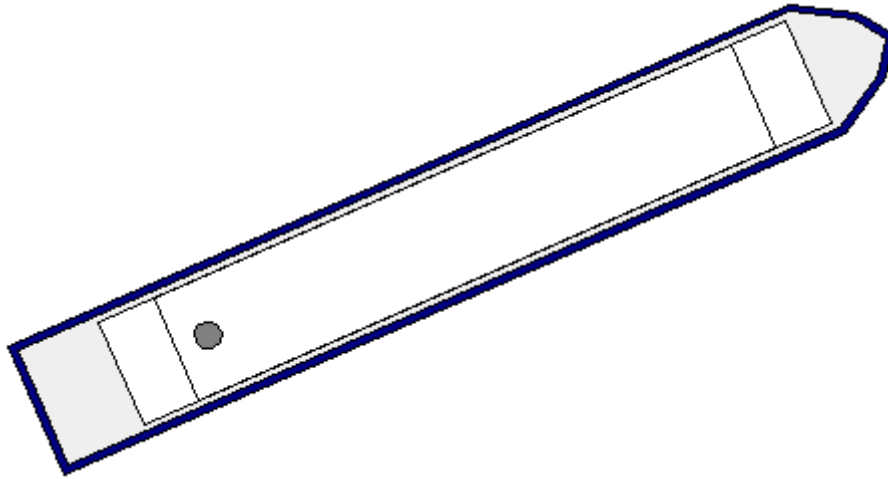


Figure 32 - Représentation graphique des navires de passagers

III.2 - Modélisation des activités industrielles

Les principes de modélisation des activités portuaires liées à la manipulation des marchandises est assimilé à une activité industrielle (au sens de la Directive Européenne). Le problème de la modélisation et de la gestion de ces activités a été étudié en détail à travers plusieurs projets Européens, comme IMAGINE⁷ et NoMePorts⁸.

Dans sa version actuelle, MithraSIG intègre un module correspondant à ces besoins et qui permet notamment de modéliser des sources de bruit de type industriel à partir de deux bases de données intégrées dans l'outil:

- La base de données IMAGINE
- La base de données interne au logiciel, contenant les sources ajoutées par le CSTB et GEOMOD.

⁷ IMAGINE : Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment, Contract Number: SSPI-CT-2003-503549-IMAGINE

⁸

https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=NoMeports_GPG_PANMM1.pdf

Dans la version incluant la fonctionnalité portuaire, la base de données interne au logiciel a été enrichie pour intégrer des modèles issus de mesures effectués par le CSTB dans le cadre du projet Décibel.

La base Imagine possède des spectres dont les valeurs par fréquence sont définies en dBA, ce qui n'est pas homogène avec les autres spectres définis dans MithraSIG. Ainsi, afin de maintenir une cohérence avec le reste du logiciel et pour en faciliter la compréhension, tous les spectres des modèles de sources stockés dans la base de données interne du logiciel et issus de la base Imagine ont été définis en dB, avec la somme présentée en dBA, comme c'est le cas pour les sources personnelles.

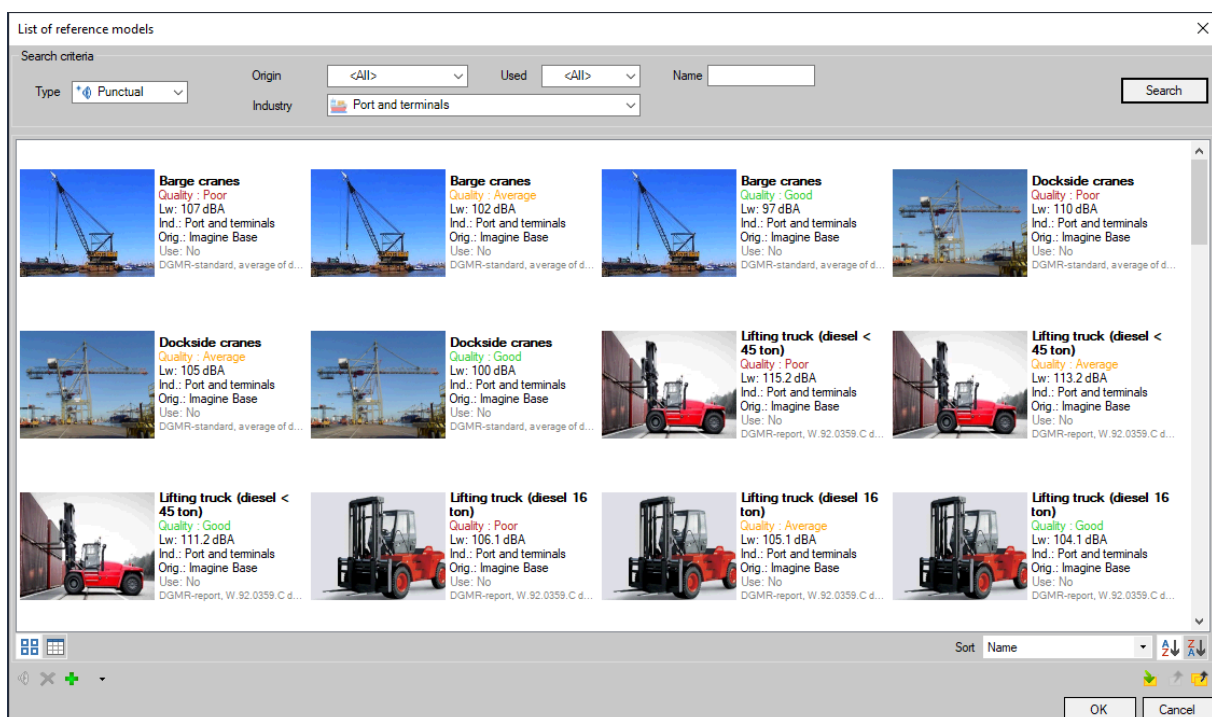


Figure 33 - Exemple de modèles de source dans MithraSIG

Un utilisateur peut également ajouter ses propres modèles de sources.

III.2.1 - Ajout de métadonnées aux sources industrielles

Un gros travail a été effectué pour ajouter des métadonnées sur tous les modèles de sources de la base de données interne. On retrouve pour chaque modèle les métadonnées suivantes :

- Une photo représentant la source
 - La qualité acoustique de la source (voir plus bas)
 - La provenance (champ texte pouvant valoir Geomod/CSTB, Imagine, personnelle)
- Dans l'interface, ce champ apparaîtra sous la forme d'une icône.

- Une catégorie, permettant de classifier la source. Exemple : Navire, Chargement, Transport, Site industriel, Aéroporté, Sites de construction, etc.)

La définition du champ « qualité » est décrite dans le projet Européen Imagine :

Quality : Quality of the source in terms of noise emissions and extent of applied noise control will be categorized into "poor", "average" and "good" only.

The terms poor, average and good have the following interpretation:

- *Poor: no noise mitigation measures have been taken and the machine/source is either old or badly maintained. The sound power levels are not always based on detailed measurements, but some examples have been found.*
- *Average: some noise mitigation measures have been taken and the machine/source is adequately maintained. If no other information of a specific machine/source is available, the source is called average.*
- *Good: the sound power levels of these machines/sources are among the lowest you can buy or manufacture. No research has been done whether these sources may be called Best Available Techniques.*

Une source de bonne qualité n'est donc pas une source peu bruyante, mais plutôt une source bien entretenue et opérant suivant de bonnes pratiques. Elle émet donc généralement moins de bruit qu'une source de faible qualité.

III.2.2 - Interface de choix du modèle d'une source

Afin d'améliorer la gestion et l'utilisation des différentes sources de bruit portuaire, l'interface de choix du modèle d'une source industrielle a été complètement revue. La présentation des modèles a été complètement repensée pour mieux mettre en évidence les différentes spécificités de chaque modèle. Ainsi, les modèles sont présentés sous la forme de tuiles contenant les informations suivantes :

- Le nom du modèle de source
- La photo associée au modèle de source
- La qualité acoustique du modèle de source
- La puissance acoustique du modèle de source
- La catégorie du modèle de source
- La provenance du modèle de source
- S'il est utilisé ou non dans le projet actuel
- Les éventuels commentaires associés au modèle de source

Les modèles peuvent également être présentés sous la forme d'une liste, avec l'affichage des différentes informations citées ci-dessus.

Une fonction de recherche a été mise en place permettant de filtrer l'affichage des modèles selon les critères suivants :

- Type de source auquel le modèle est associé : Ponctuelle, Linéaire, Façade, Surfacique
- Nom du modèle
- Provenance
- Catégorie
- Utilisation ou non dans le projet courant

Cela permet par exemple de sélectionner rapidement un modèle représentant un navire, en filtrant sur la catégorie « Navire ».

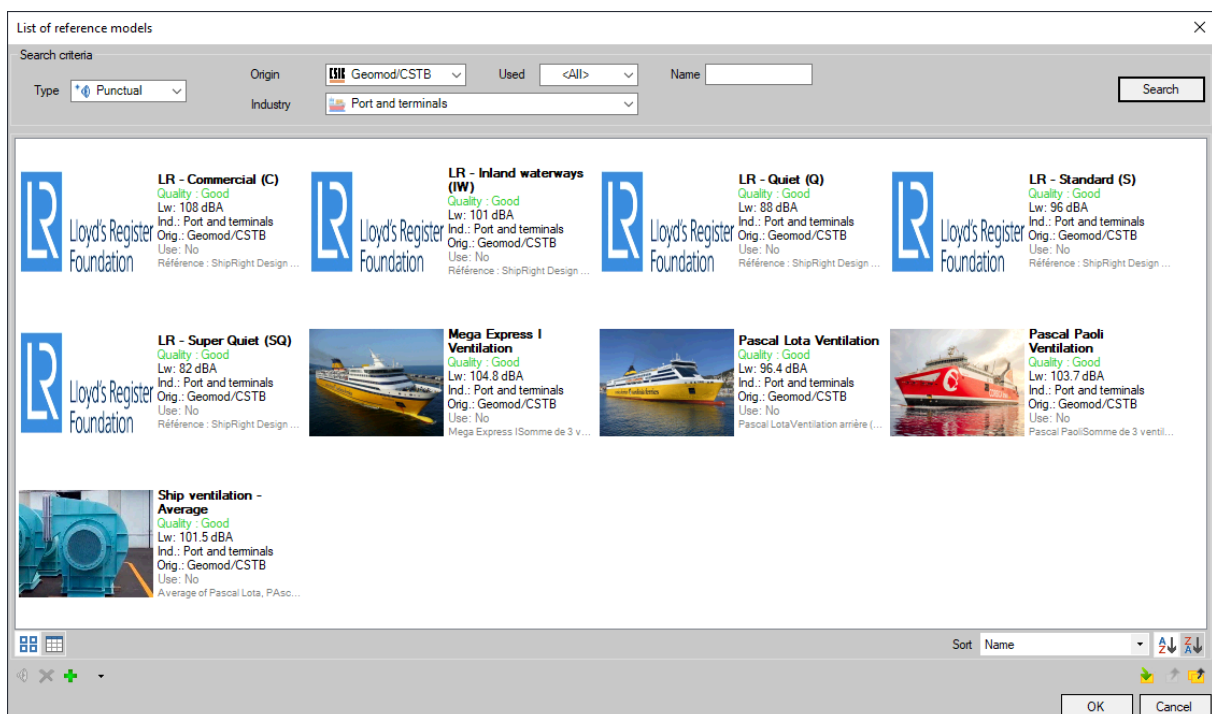


Figure 34 - Interface filtrant toutes les sources relatives aux ports dans MithraSIG

III.3 - Trafic routier et ferroviaire

Les activités portuaires génèrent en général un important trafic routier et ferroviaire. MithraSIG inclut les fonctionnalités nécessaires pour une modélisation détaillée du bruit induit par le transport des personnes et des marchandises par route ou par voie ferrée. Aucune modification n'est envisagée dans le cadre du projet REPORT.

Pour ce qui concerne le bruit routier, MithraSIG intègre plusieurs modèles d'émission :

- CSTB-92
- AR-Interim (équivalent Guide du Bruit)
- NMPB-2008

- Hamonoise/IMAGINE
- CNOSSOS-EU

Il convient de noter que le modèle CNOSSOS-EU est une adaptation du modèle IMAGINE d'origine et qu'il a été fortement simplifié afin de le rendre plus facile à utiliser dans le cadre de la production des cartes stratégiques. De ce fait, la possibilité de modéliser les différentes allures des véhicules à basse vitesse a été remplacé par une correction heuristique applicable aux carrefours. Il peut être démontré que cette correction correspond en fait à un flux de véhicules à une vitesse de 50 km/h à l'approche et au départ d'un carrefour en zone urbaine.

Dans les zones portuaires, la vitesse de circulation est souvent limitée à 30 km/h. De plus, lors du chargement et de déchargement des ferries, le flux est souvent intermittent avec des phases de décélération, d'arrêt et d'accélération. Dans ces conditions, il peut être préférable d'utiliser le modèle NMPB ou IMAGINE qui permet une modélisation plus fine des effets d'un trafic pulsé à basse vitesse.

L'efficacité des revêtements de chaussée sur un trafic à basse vitesse fait partie d'études particulières dans les projets REPORT et Décibel.

III.4 - Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques en bord de mer sont souvent dominées par des vents dominants, créant des conditions de propagation favorables du port vers certaines régions urbaines. Dans ces conditions, l'utilisation de valeurs par défaut peut induire des sous-estimations importantes du niveau d'exposition et des populations exposées au bruit.

Une méthodologie spécifique pour tenir compte de ces phénomènes a été proposée dans le projet Décibel. Ainsi, des roses d'occurrence de conditions de propagation favorable ont été déterminés à partir de données météorologiques locales au format METAR.

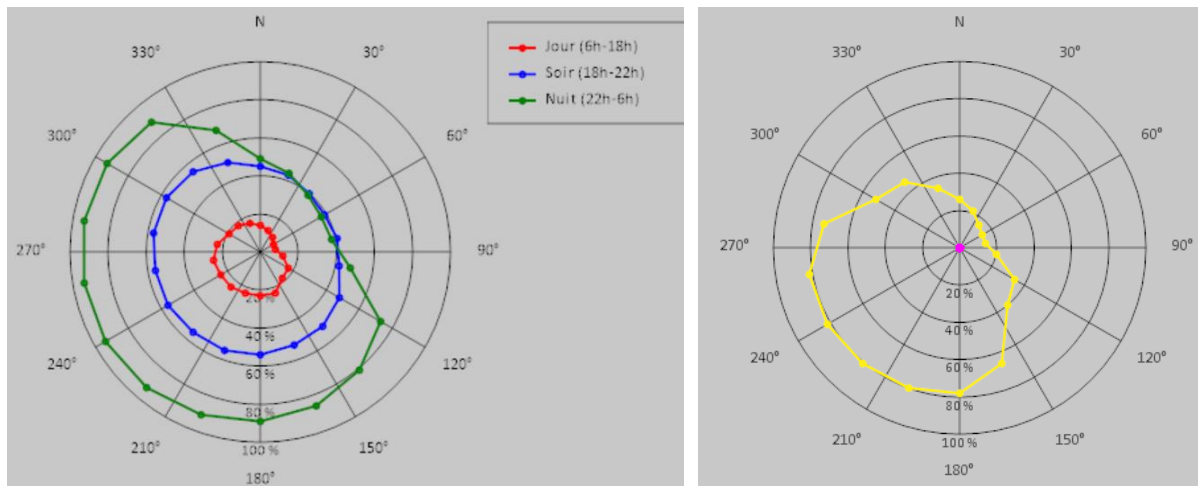


Figure 35 - Rose d'occurrences des conditions de propagation favorable à Bastia pour des périodes particulières.
 Gauche : périodes réglementaires jour/soir/nuit - droite : période 7h-8h.

Pour les ports en bord de mer, et en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer la gêne sonore créée par des activités spécifiques et/ou intermittentes, se produisant à certaines périodes de l'année ou certaines heures de la journée, il convient de prendre en compte :

- Les effets saisonniers, par exemple le trafic généré par le tourisme l'été ;
- Les variations saisonnières des vents dominants ;
- Les effets thermiques jour/nuits, lever/coucher de soleil, par exemple pour l'évaluation du bruit des ferries qui desservent les ports à des heures fixes.

Jusqu'alors, MithraSIG permettait uniquement de gérer un découpage périodique basé sur une journée. Les différentes périodes du logiciel faisaient toujours référence à une ou plusieurs heures de la journée.

Afin de prendre en compte les spécificités des ports, un nouveau type de découpage périodique a été ajouté : le découpage périodique non horaire.

Ce type de découpage périodique permet de définir plusieurs périodes qui peuvent correspondre à des choses indépendantes de la journée.

Par exemple :

- Période "Été", Période "Hiver"
- Période "Heure de pointe", Période "Heures creuses"
- Période "Chargement", Période "A quai", Période "Déchargement"
- Etc.

Il est également possible de spécifier deux (ou plus) périodes qui n'ont aucun lien entre elles, comme par exemple une période "Été-2020", une période "Heure de pointe-2019" et une période "Prévision-2025".

Dans le cas d'un découpage non horaire, les trafics des routes et voies ferrées est toujours spécifié en débit par heure.

Les indicateurs disponibles sur ce type de période sont :

- L'indicateur LAeq spécifique à une période
- L'indicateur LAeq global à toutes les périodes
- L'indicateur LAeq global à plusieurs périodes

IV - Implémentation du module portuaire dans MithraSIG

IV.1 - Création d'un navire

La création d'un navire dans MithraSIG se fait en activant la fonction de dessin d'un navire :



Cette fonction permet de dessiner automatiquement un navire. Le navire est construit à partir d'un segment que l'utilisateur dessine et qui permet d'indiquer l'orientation et la longueur du navire. Ensuite, l'utilisateur entre les caractéristiques géométriques du navire et ses modes de fonctionnement. A partir des caractéristiques géométriques, le navire est automatiquement dessiné dans la fenêtre graphique.

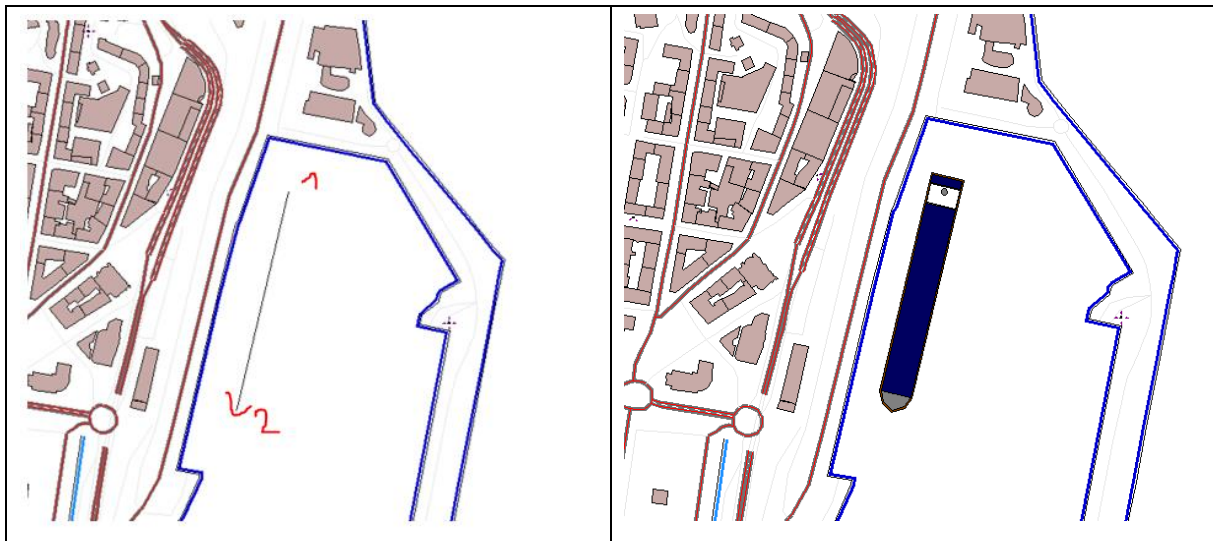


Figure 36 - Dessin d'un navire à partir d'un segment

Dans le cadre (limité) du projet REPORT, deux catégories de navires ont été implémentées : les porte-conteneurs et les navires de passagers. D'autres catégories pourraient être envisagées ultérieurement dans la version commerciale du logiciel.

Le calcul de MithraSIG est uniquement dans l'air. Il n'y a pas de propagation sous l'eau. La surface de l'eau est modélisée comme une surface réfléchissante. Nous ne modélisons pas la partie immergée du navire.

IV.2 - Représentation graphique d'un navire

Un navire est composé de plusieurs éléments selon le type de navire. Il y a toujours le pont du navire, sa superstructure et sa cheminée. Pour un porte-conteneurs, il peut également y avoir des conteneurs.

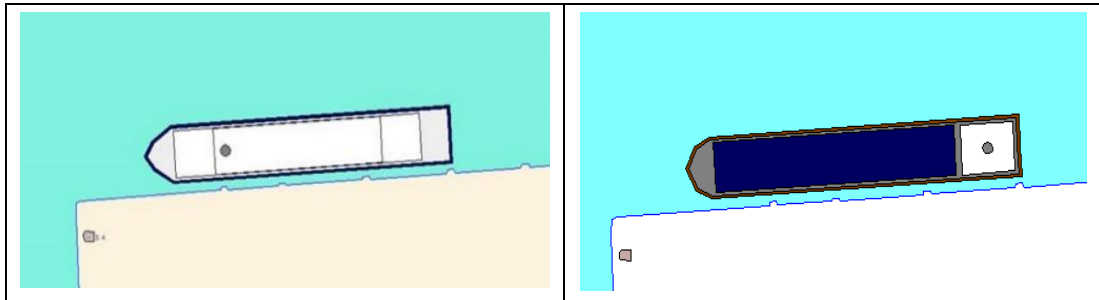


Figure 37 – Rendu 2D d'un navire de passager (à gauche) et d'un porte-conteneurs chargé (à droite)

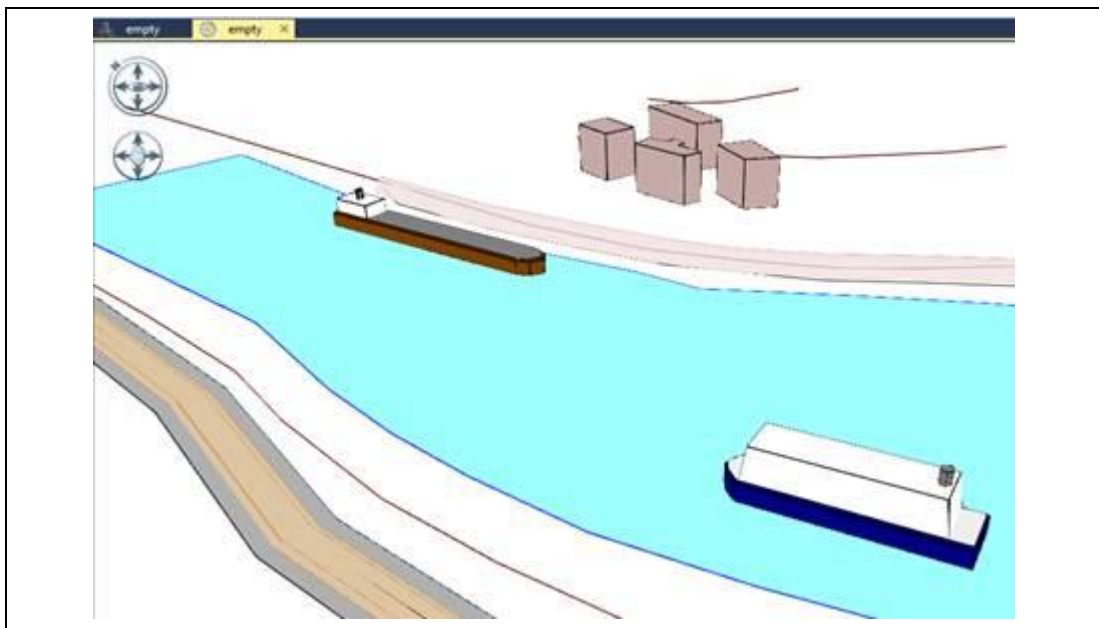


Figure 38 - Rendu 3D des navires dans MithraSIG

IV.3 - Paramètres acoustiques du navire

IV.3.1 - Mode de fonctionnement

Une fois les caractéristiques géométriques du navire renseignées, il faut spécifier les caractéristiques acoustiques du navire. Afin de simplifier l'utilisation, nous associons une seule donnée acoustique (globale) au navire que nous appelons mode de fonctionnement. Ce mode de fonctionnement définit les sources actives et leur emplacement et modélise une action particulière effectuée par le navire. Les

caractéristiques acoustiques du navire dépendent donc de la période étudiée et de l'action effectuée.

Un navire n'effectue pas toujours la même action au cours de la journée. Ainsi selon la période, il n'a pas forcément le même mode de fonctionnement :

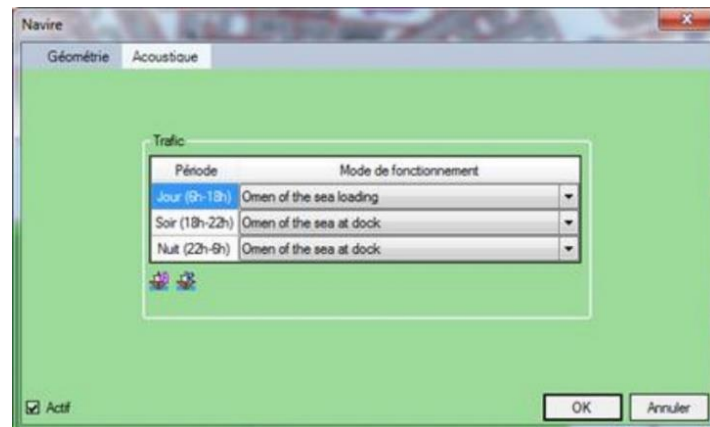


Figure 39 – Saisie des modes de fonctionnement par période de calcul

IV.3.2 - Ajouter un mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement décrit les sources du navire, leur emplacement sur le navire et leurs caractéristiques acoustiques (puissance, directivité, etc.).

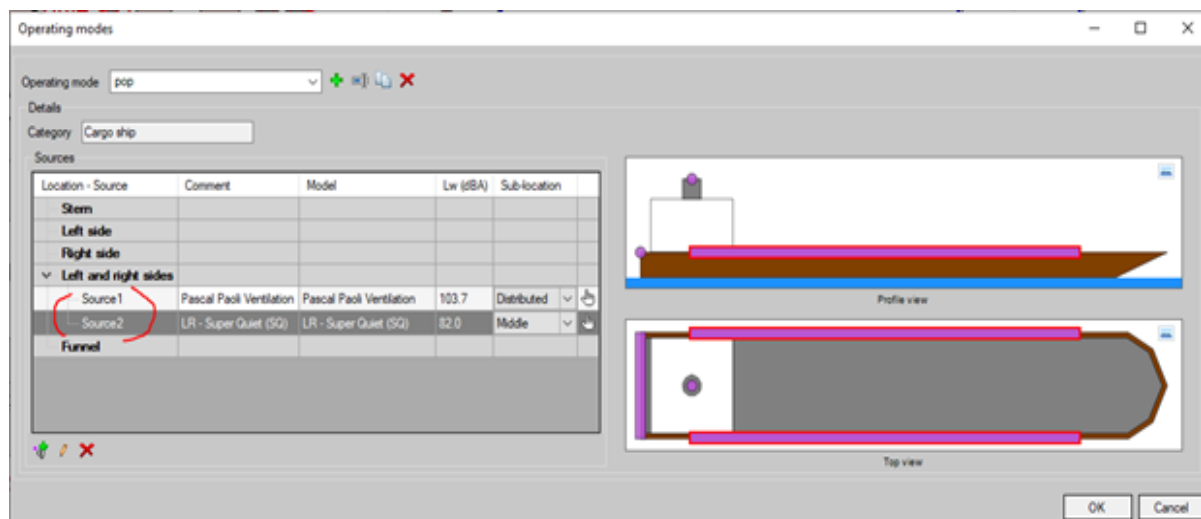


Figure 40 – Définition des sources actives pour un mode de fonctionnement

La source peut être ajoutée à une position prédéfinie du navire. Actuellement, les emplacements disponibles sont :

- Le côté gauche du navire
- Le côté droit du navire
- Le côté gauche et le côté droit du navire

- La cheminée
- La poupe

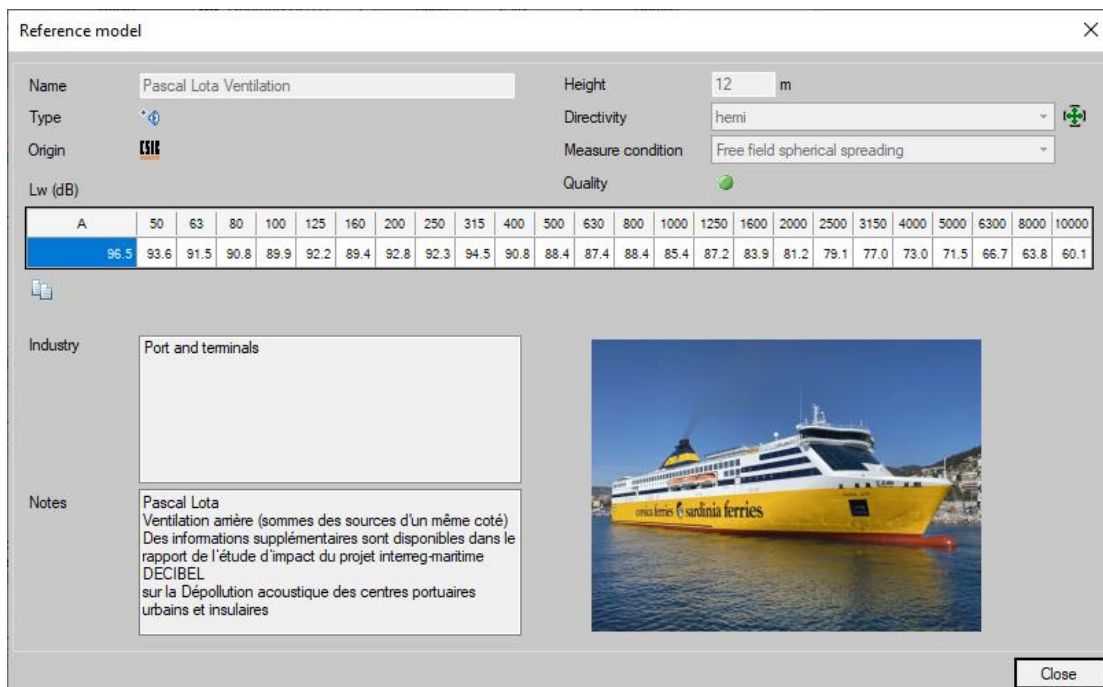
Il est également possible de spécifier plus précisément sur quelle partie de l'emplacement se trouve la source. Ainsi, pour les sources présentes sur un côté du navire, la source peut être placée :

- Sur tout le côté,
- Sur l'avant du côté,
- Sur l'arrière du côté,
- Au milieu du côté.

Pour les sources présentes à la poupe, elles peuvent se situer :


- Le long de la poupe,
- Sur la partie gauche de la poupe,
- Au milieu de la poupe,
- Sur la partie droite de la poupe.


Pour ajouter une source, il faut spécifier l'emplacement et choisir un modèle de référence présent dans la base de données source MithraSIG. Un modèle de référence est généralement une source ponctuelle qui décrit les caractéristiques acoustiques d'une source :




Reference model

Name: Pascal Lota Ventilation


Type: 

Origin: 

Height: 12 m

Directivity: hemi 


Measure condition: Free field spherical spreading

Quality: 

A	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
96.5	93.6	91.5	90.8	89.9	92.2	89.4	92.8	92.3	94.5	90.8	88.4	87.4	88.4	85.4	87.2	83.9	81.2	79.1	77.0	73.0	71.5	66.7	63.8	60.1

Industry: Port and terminals

Notes: Pascal Lota Ventilation arrière (sommes des sources d'un même côté)
Des informations supplémentaires sont disponibles dans le rapport de l'étude d'impact du projet interreg-maritime DECIBEL sur la Dépollution acoustique des centres portuaires urbains et insulaires



Close

Figure 41 – création de modèles de référence pour les sources associées aux navires

De nouveaux modèles de référence peuvent être créés par l'utilisateur.

Notez qu'un mode de fonctionnement ne contient que les sources en fonctionnement pour l'action décrite. Les sources inactives ne doivent pas être créées. Par exemple, pour un navire amarré, nous ajouterons les sources correspondant à la ventilation, voire à la cheminée. Les sources correspondant aux moteurs ne seront pas ajoutées tant qu'elles ne sont pas actives.

IV.4 - Configuration des paramètres de calcul

Les méthodes de calculs peuvent être choisies indépendamment de ce projet. En général, la méthode de calcul sera choisie en fonction de l'exploitation visée et résultera souvent un compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Pour les études d'impact, une méthode nationale peut être imposée comme la NMPB ou la norme ISO 9613-2. Pour la production de cartes de bruits stratégiques conformes à la Directive Européenne, la méthode CNOSSOS-EU est obligatoire. Pour des études particulières, notamment dans le cas de plan d'actions particulier mettant en œuvre des solutions innovantes, une méthode plus précise, comme celle développée dans le projet Harmonoise est disponible.

Nombre de réflexions :

- Il est recommandé d'autoriser 2 réflexions ou plus, pour inclure au moins une réflexion près de la source et une réflexion côté récepteur.
- 3 ou 5 réflexions sont à préconiser s'il y a de multiples réflexions entre le navire et les murs du port et/ou dans des environnements urbains denses.

IV.4.1 - Stockage des résultats

Deux types de stockage sont possibles pour les navires, le stockage « par nature » et le stockage « dynamique ».



Figure 42 - Interface de saisie du mode de calcul

IV.4.2 - Stockage par nature

Avec le stockage « par nature », il est possible d'activer/désactiver entièrement un navire lors de l'analyse des résultats. Il ne sera pas possible d'activer ou de désactiver chaque source du navire. On possède donc les contributions par navire.

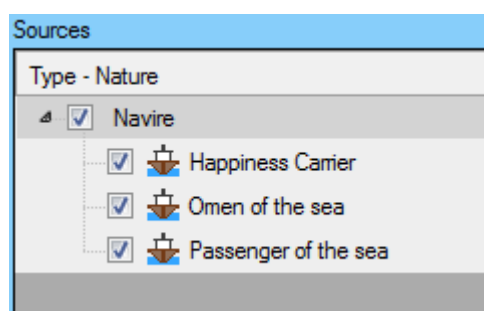


Figure 43 – Activer/désactiver un groupes de sources

IV.4.3 - Stockage dynamique

Avec le stockage « dynamique », il est possible d'activer/désactiver individuellement chaque source situées à un emplacement spécifique sur le navire ou bien le navire lui-même.

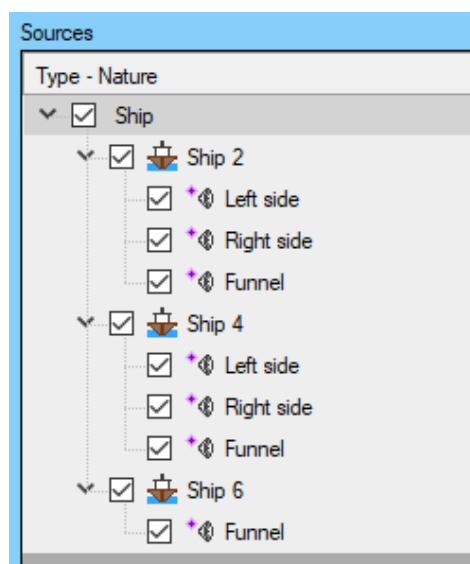


Figure 44 – Activer/désactiver les sources individuelles

IV.5 - Calcul des navires

IV.5.1 - Géométrie du navire

La géométrie des navires est composée de différents éléments très réfléchissants (matériau A0). Les navires peuvent être considérés comme des écrans très réfléchissants. Le navire n'a pas sa propre altitude, il est toujours positionné au sol (sur l'eau) et son altitude Z est toujours recalculée au lancement des calculs.

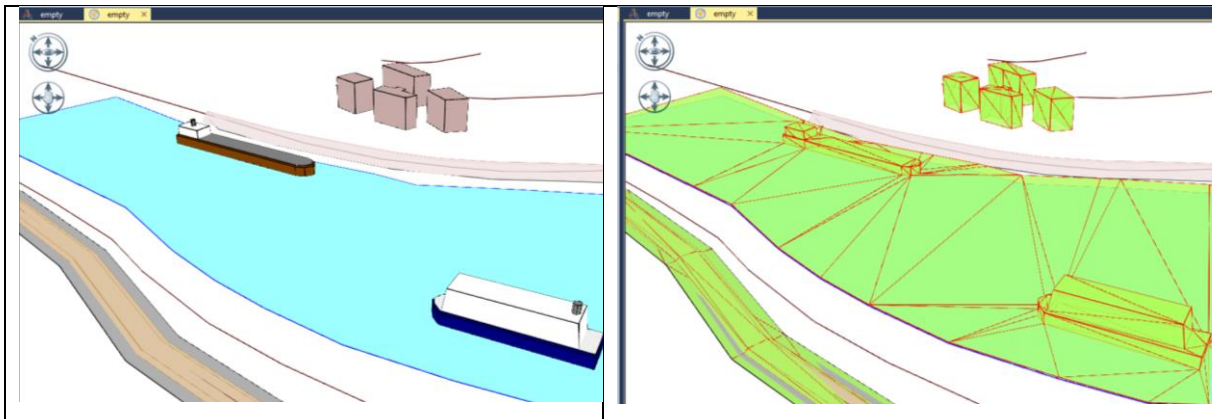
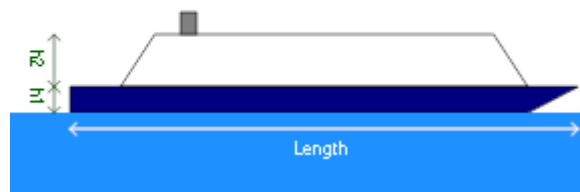


Figure 45 – Vue 3D d'un navire dans l'interface de MithraSIG (à gauche) et modèle équivalent dans le moteur de calcul BANGA (à droite).

Les navires de passagers peuvent avoir des surfaces en pente sur la partie supérieure du navire.



IV.5.2 - Sources acoustiques du navire

L'impact acoustique d'un navire sur une période est déterminé par les sources définies au niveau de son mode de fonctionnement.

Chaque emplacement (côté gauche, cheminée, poupe, etc.) a ses propres caractéristiques.

Plusieurs sources peuvent être présentes au même endroit. Si deux sources définies l'une en octaves et l'autre en 1/3 d'octaves sont présentes, la précision utilisée sera celle de la première source rencontrée.

La directivité et les conditions de mesure ne sont prises en compte que si elles sont uniques pour toutes les sources et toutes les périodes de temps à un emplacement défini. Si plusieurs conditions de mesure sont présentes, nous considérons les conditions comme non définies.

- Cheminée : la source de la cheminée est omnidirectionnelle par défaut. La source est positionnée à la hauteur maximale de la cheminée au centre de sa géométrie.
- Côté gauche et côté droit : Les sources sont positionnées selon le sous-emplacement spécifié :

- Réparti : 7 sources ponctuelles sont placées le long du navire, sur 90 % de la longueur du navire (entre 5 % et 95 %). La puissance de ces sources est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement et est répartie proportionnellement sur chacune des sources ponctuelles.
- Arrière : 1 source ponctuelle est placée sur la partie arrière du côté du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.
- Milieu : 1 source ponctuelle est placée au milieu du côté du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.
- Avant : 1 source ponctuelle est placée sur la partie avant du côté du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.

Les sources sont décalées du bord du navire de 10 cm. Leur émission est normale à la surface verticale représentant la coque du navire et elles sont hémisphériques. La hauteur des sources correspond au paramètre « hauteur des sources latérales » du navire.

- Poupe :
 - Réparti : 4 sources ponctuelles sont placées le long de la poupe du navire, sur 90 % de la largeur du navire (entre 5 % et 95 %). La puissance de ces sources est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement et est répartie proportionnellement sur chacune des sources ponctuelles.
 - Gauche : 1 source ponctuelle est placée sur la partie gauche de la poupe du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.
 - Milieu : 1 source ponctuelle est placée au milieu de la poupe du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.
 - Droit : 1 source ponctuelle est placée sur la partie droite de la poupe du navire. Sa puissance est déterminée en tenant compte des modèles de référence spécifiés sur l'emplacement.

Les sources sont décalées du bord du navire de 10 cm. Leur émission est normale à la surface verticale représentant la coque du navire et elles sont hémisphériques. La hauteur des sources correspond à 90% de la hauteur de la coque.

Les figures ci-dessous illustrent le rayonnement des différentes sources associées aux navires.

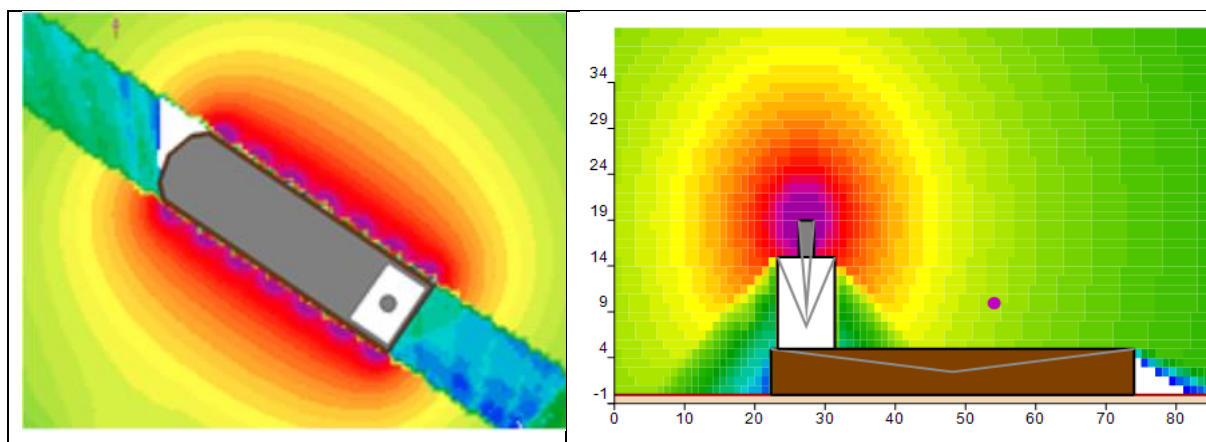


Figure 46 - Carte horizontale montrant les sources réparties le long du navire et coupe verticale montrant le rayonnement des sources associées à la cheminée.

IV.6 - Résultats des calculs

Les navires sont pris en charge par tous les types de rendu (cartes, étiquettes) comme les autres sources :

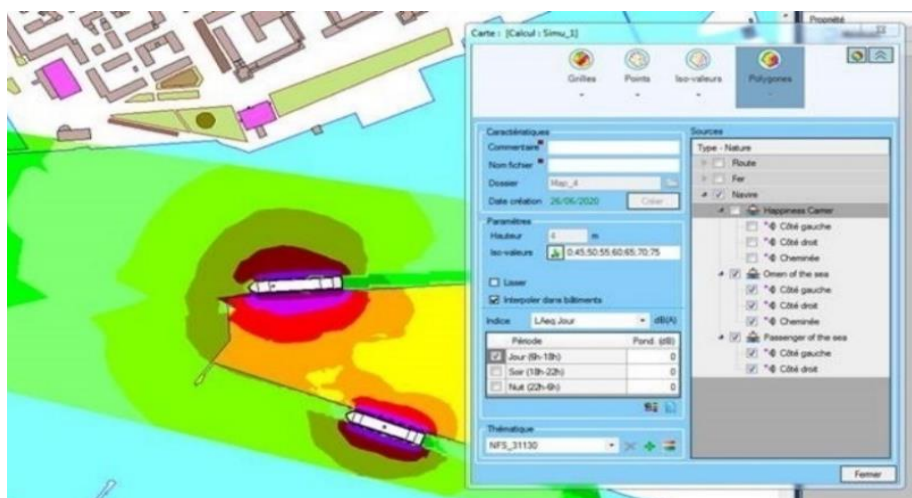


Figure 47 - Création d'une carte avec des navires

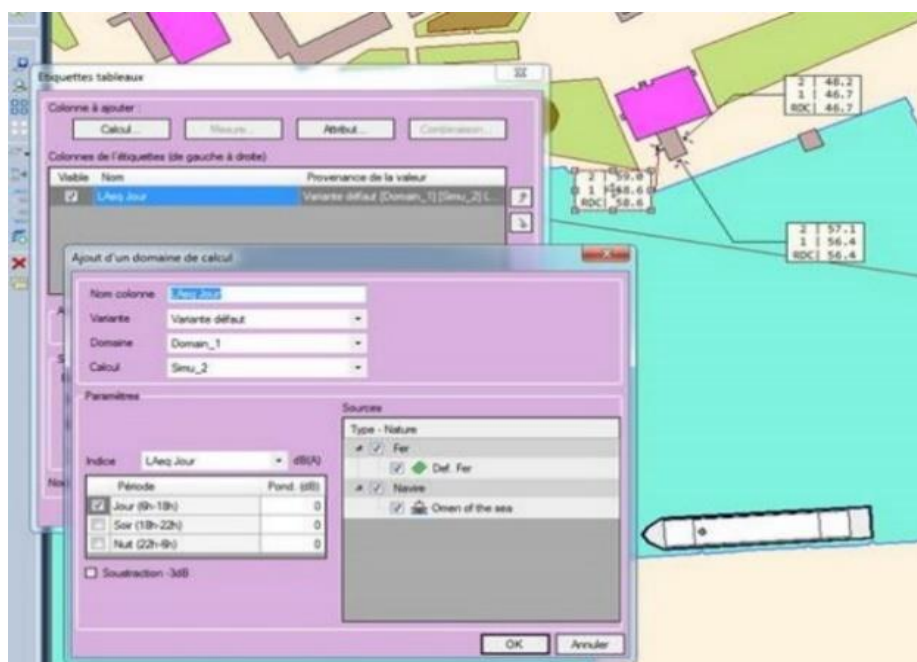


Figure 48 - Création d'étiquettes avec des navires

Annexe A - Modélisation à partir de mesures in situ

On décrit ici l'approche préconisée pour une modélisation des sources portuaires à partir de données mesurées sur site. Cette approche a été développée dans le cadre du projet DECIBEL qui fournit une méthodologie dédiée aux études d'impact des zones portuaires. Des informations supplémentaires sont disponibles dans le rapport de l'étude d'impact « 20191220_DECIBEL_Rapport_T1.1.2_V2.pdf » du projet DECIBEL.

- Compléter la base de données des sources portuaires
- Valider le modèle de données
- Valider les calculs (dans la tâche T3.2)

A.1 Méthodologie pour la modélisation des sources

On décrit brièvement les étapes nécessaires à la modélisation des sources. Ces étapes sont :

- Mesures sur site
- Estimation du niveau de puissance L_w champ libre à partir de la mesure
- Modélisation géométrique du navire
- Modélisation des sources

A.1.1 Mesures sur site

Les données issues des mesures sur site sont :

- Niveau de pression acoustique L_p par bande de fréquences (1/3 octave) associé à une source particulière, le point de mesure étant choisi de manière à ce que les autres sources ne contribuent que faiblement aux niveaux mesurés ;
- Position du point de mesure (absolue ou relative à la source) ;
- Position approximative de la source ponctuelle équivalente ;
- Données sur le site (type de sol, réflecteurs, etc.).

A.1.2 Estimation du L_w champ libre à partir de la mesure

Le spectre de puissance des sources équivalentes est estimé à partir de la mesure en faisant les hypothèses suivantes :

- La puissance estimée est une puissance champ libre
- La source équivalente est ponctuelle et omni-directionnelle ;
- Le sol est un sol dur
- Le champ direct et la réflexion de sol dominant l'ensemble des contributions au point de mesure

Dans le cas général, la source est éloignée de réflecteurs autre que le sol. Le niveau mesuré s'exprime alors en fonction de la puissance champ libre suivant

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) + 3 + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right)$$

Où d est la distance source-récepteur, k , le nombre d'onde et l , la hauteur de la source par rapport au sol.

En présence d'un réflecteur, on suppose que la source est sur le réflecteur. On peut dans ce cas la modéliser par une source hémisphérique orientée suivant la normale sortante au réflecteur. Le niveau mesuré s'exprime alors en fonction de la puissance champ libre suivant

$$L_p = L_w + \mathbf{3} + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) + 3 + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right)$$

A.1.3 Modélisation du navire

La modélisation du navire suit la procédure décrite à la section III - du présent rapport.

Si nécessaire, une modélisation manuelle peut être faite comme décrit ci-dessous.

Le navire est constitué de bâtiments de hauteurs variables et d'altitude nulle ($z=0$), c'est-à-dire au niveau de la mer

La procédure de création manuelle des navires dans MithraSIG inclue les étapes suivantes :

- Pour chaque navire, on crée dans un calque associé au navire les polygones de $z=0$. Pour chaque polygone, on crée un attribut HAUTEUR contenant la hauteur de la partie du navire associée au polygone (on procède par copie et modification du premier polygone pour éviter de répéter la création de l'attribut HAUTEUR).
- Pour chaque navire, on intègre le calque des polygones au modèle en tant que bâtiments. On choisit « ZMin » pour le mode de drapage, et « Hauteur » pour le calcul de la hauteur en indiquant l'attribut #HAUTEUR. On décoche « Réinitialisation ». Par défaut, chaque bâtiment créé est actif.
- Pour chaque bâtiment, on modifie les paramètres suivants :
 - Commentaire : "Nom du Navire" – numéro du bâtiment (ex. Pascal Paoli – 1)
 - Classification : Autre bâtiment
- Remarque : la hauteur est arrondie à 0.05 cm près

Pour placer le navire :

- sélectionner tous les bâtiments constituant le navire

- clic droit / Déplacer
- choisir l'angle, e.g. 1°
- Note : à chaque clic gauche, le navire sera déplacé au point cliqué et tourné de l'angle

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) + 3 + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right) L_p$$

$$= L_w + \mathbf{3} + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) + 3 + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sin(2kl)}{2kl} \right)$$

A.1.4 Modélisation des sources sonores du navire

La modélisation des sources du navire suit la procédure décrite à la section III - du présent rapport.

On donne plus bas la description de la modélisation "manuelle" des sources sonores.

Une fois le spectre de puissance champ libre estimé, les sources sont positionnées sur les bâtiments associés au navire. La condition de mesurage de la source est « champ libre ». Les sources positionnées sur les flancs du navire sont de type héli sphérique orientées suivant la normale sortante à la paroi. Les autres sources sont de type omnidirectionnel.

Le navire est défini par une longueur L , une largeur l et une hauteur h . Une source sur le flanc du navire est définie par son abscisse suivant l'axe x_0 mesuré depuis l'arrière du navire, sa hauteur h_0 au-dessus de la ligne de flottaison et le côté bâbord/tribord de la source. Une source sur le navire est définie par son abscisse suivant l'axe x_0 mesuré depuis l'arrière du navire et sa hauteur h_0 au-dessus du navire.

Notons que le navire peut aussi être défini en deux parties : la super structure à l'arrière (définie par une hauteur et une longueur) suivie à l'avant d'une deuxième structure de hauteur et de longueur différente.

A.2 Application aux navires du port de Bastia

On modélise suivant la méthode exposée plus haut 3 navires sur le port de Bastia, le Pascal Paoli, Le Pascal Lota et le Mega Express I.

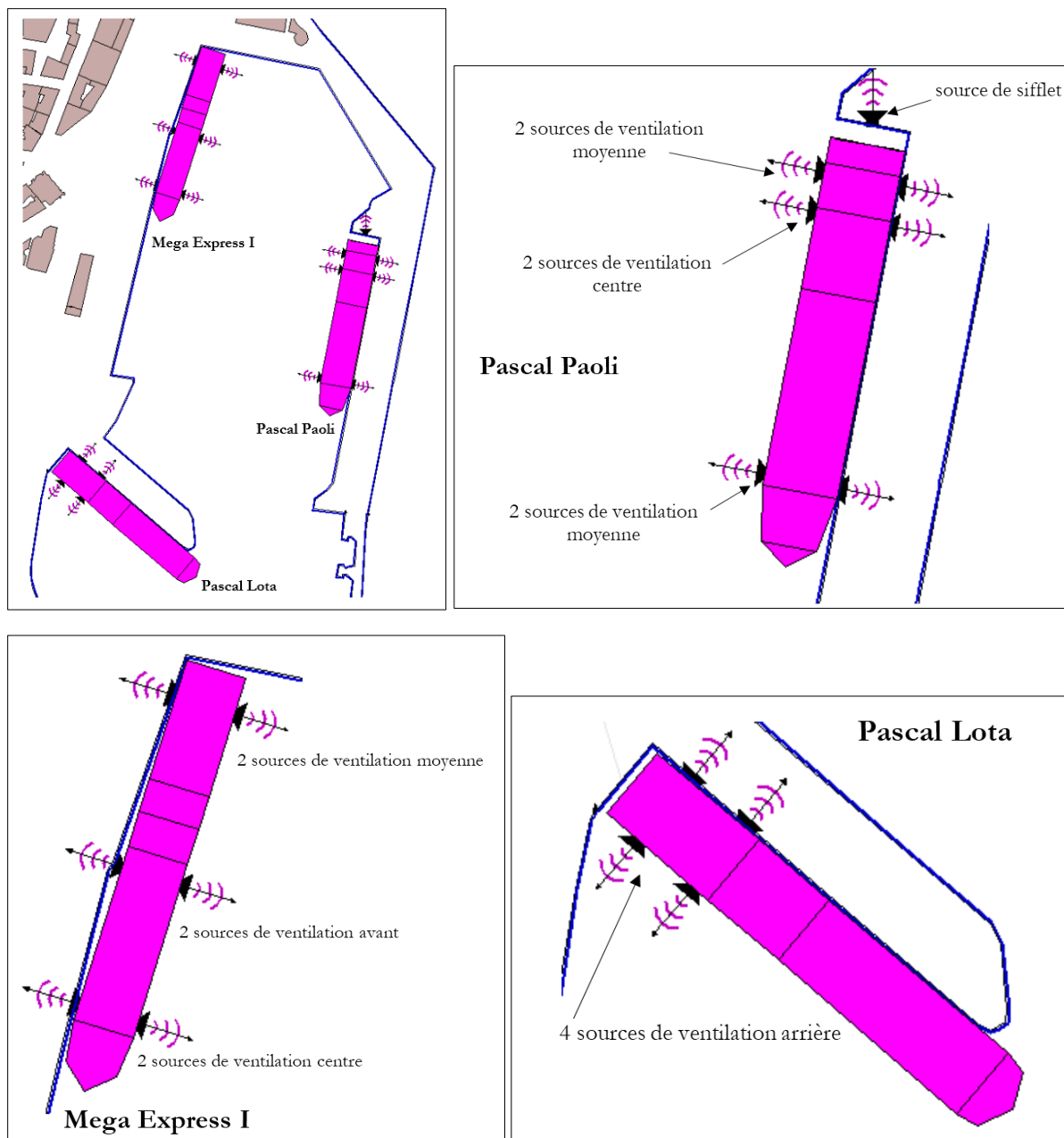
Les sources modélisées sont :

- Les sources de ventilation des 3 navires
- La source du bruit de sifflet du Pascal Paoli

La source de sifflet est une source omni à 0.05 m du sol.

Les sources de ventilation sont des sources hémisphériques sur les flancs des navires à 10 m du sol pour les deux Pascal et à 12 m pour le Mega Express I.

La géométrie des navires est représentée sur les figures suivantes :



Les données géométriques pour chaque navire sont données ci-dessous :

Pascal Paoli

Géométrie	$L = 174.4 \text{ m} ; l = 30.5 \text{ m} ; h = 25 \text{ m}$
Sources ventilation arrière	$x_0 = 14.3 \text{ m} ; h_0 = 10 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Sources ventilation arrière/centre	$x_0 = 30.9 \text{ m} ; h_0 = 10 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Sources ventilation avant	$x_0 = 139.1 \text{ m} ; h_0 = 10 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Source sifflet	$x_0 = -10.1 \text{ m} ; h_0 = 1.5 \text{ m} ; \text{centre}$

Mega Express I

Géométrie	$L = 176.4 \text{ m} ; l = 24.8 \text{ m} ; h = 25 \text{ m}$
Sources ventilation arrière	$x_0 = 14.9 \text{ m} ; h_0 = 12 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Sources ventilation arrière/centre	$x_0 = 86.4 \text{ m} ; h_0 = 12 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Sources ventilation avant	$x_0 = 143.8 \text{ m} ; h_0 = 12 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$

Pascal Lota

Géométrie	$L = 176.0 \text{ m} ; l = 27.6 \text{ m} ; h = 27 \text{ m}$
Sources ventilation arrière	$x_0 = 14.9 \text{ m} ; h_0 = 12 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$
Sources ventilation arrière/centre	$x_0 = 40.3 \text{ m} ; h_0 = 12 \text{ m} ; \text{gauche \& droit}$

Les spectres de puissance des sources sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

Pascal Paoli

ventilation centre : 6h-18h (tranches h7 à h18)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
100.3	97.7	94.6	90.9	93.2	86.9	89.1	91.5	89.4	95.3	92.6	91.0	91.1	88.8	88.0	86.0	83.4	82.0	80.6	78.0	77.0	74.6	72.1	69.6

sifflet : 7h-8h (tranche h8)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
106.5	106.5	107.1	108.9	108.7	105.4	103.6	101.2	99.5	101.4	102.2	100.3	100.5	99.4	97.0	94.7	92.7	92.7	89.0	86.8	83.1	81.9	73.9	69.9

sifflet : 7h-8h (tranche h8) avec LAmax,1s

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
111.7	110.5	112.2	114.1	114.7	110.1	108.1	106.1	104.8	105.6	107.2	105.3	105.7	104.5	101.9	99.6	96.5	96.7	93.3	93.0	88.5	88.0	78.4	75.8

Mega Express I

ventilation centre : 7h-9h (tranche h8-h9)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
101.1	99.5	94.3	95.1	96.5	95.4	93.7	99.3	89.5	92.7	91.0	94.8	89.8	85.3	83.1	82.7	81.4	78.7	79.1	77.2	74.9	70.7	67.4	63.1

ventilation avant : 7h-9h (tranche h8-h9)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
98.0	97.2	93.6	98.2	103.9	100.5	97.6	96.5	96.0	98.8	96.1	93.5	92.9	90.4	88.4	87.4	87.5	85.2	81.9	80.8	80.2	76.6	72.2	66.4

Pascal Lota

ventilation arrière (les 4 sources) : 7h-20h (tranches h8 à h20)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
90.6	88.5	87.8	86.9	89.2	86.4	89.8	89.3	91.5	87.8	85.4	84.4	85.4	82.4	84.2	80.9	78.2	76.1	74.0	70.0	68.5	63.7	60.8	57.1

Tout bateau

ventilation moyenne :

Pascal Paoli : ventilation avant et arrière : 6h-18h (tranches h7 à h18)

Mega Express I : ventilation arrière : 7h-9h (tranche h8-h9)

50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
96.9	95.1	92.5	94.5	96.2	93.4	94.3	95.6	93.1	95.2	92.7	92.3	91.2	88.2	87.3	85.5	83.6	81.6	79.9	77.2	75.9	72.2	69.0	64.8

Annexe B - Classification acoustique des navires

B.1 Le standard publié par LR

Cette partie reprend les idées de la LR : LLOYD'S REGISTER FOUNDATION⁹.

Référence : ShipRight Design and Construction, Procedure for the Determination of Airborne Noise Emissions from Marine Vessels, January 2019, LLOYD'S REGISTER FOUNDATION

Face à la problématique grandissante du bruit des port, la LLOYD'S REGISTER FOUNDATION a publié une méthode d'évaluation du bruit des navires dans le but de mettre en place une norme et d'une méthodologie pour contrôler les émissions de bruit aérien des navires.

La nouvelle notation définit un ensemble de niveaux limites pour les émissions de bruit aérien des navires. Cela permet aux ports de mieux surveiller les niveaux de bruit globaux des escales des navires. Il aidera les ports à déterminer quels navires et combien de navires peuvent accéder aux zones les plus sensibles au bruit du port. Cela permettra également aux ports de spécifier les navires qui nécessitent une certaine notation ABN pour rester dans une zone sensible au bruit du port, par exemple les emplacements proches des zones résidentielles.

La nouvelle notation définit cinq niveaux limites pour l'émission de bruit aérien : des classes de navire.

- *Super Quiet (SQ)*
- *Quiet (Q)*
- *Standard (S)*
- *Inland waterways (IW)*
- *Commercial (C)*

⁹ <https://www.lrfoundation.org.uk/en/>

B.2 La caractérisation des sources selon LR

Table 1.2.1 Definition of assessment criteria

Sound power		Harbour moored $L_{WA,ship}$ (dB)	Free sailing 5 knots $L_{WA,ship}$ (dB)
Super quiet	SQ	82	92
Quiet	Q	88	98
Standard	S	96	106
Inland waterways	IW	101	111
Commercial	C	108	-

Sound power		Distance, to ship side d (m)	Harbour moored $L_{Aeq,T}$ (dB)	Free sailing 5 knots $L_{pAS,max}$ (dB)
Super quiet	SQ	50	40	50
Quiet	Q	100	40	50
Standard	S	250	40	50
Inland waterways	IW	25	65	75
Commercial	C	1000	40	-

Table 1.2.2 Definition of reference sound power frequency spectrum

	16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Sum
L_{wA} standard spectrum, dB	-25	-15	-10	-5	-5	-10	-10	-15	-15	-15	0

Toutes les sources uniques sur le navire doivent être localisées et incluses dans le modèle. Les petites ouvertures de ventilation et les ouvertures de cheminée d'évacuation peuvent en général être modélisées comme des sources ponctuelles. Les grilles de ventilation plus grandes doivent être modélisées comme des sources de surface. Les sources doivent être décrites par leur niveau de puissance acoustique de source unique, L_{WA} , i , et un indice de directivité le cas échéant. Au minimum, les sources suivantes doivent être prises en compte dans la prévision :

- Bruit des échappements et des cheminées, incl. moteurs auxiliaires et principaux ;
- Entrées et évacuation d'air de ventilation ;
- Ventilateurs externes, c'est-à-dire situés dans la cheminée ;
- Bruit rayonné sur la coque, le cas échéant ;

- Tout équipement spécial en fonctionnement, c'est-à-dire pompes à cargaison, grues, etc.