

La maîtrise de la discrétion acoustique dans un programme de navire

Jean-Marc Ginoux, Michel Bertinier

DGA Techniques navales
Division «Plateformes Navales»
Département « Furtivité »
Avenue de la Tour Royale
BP 40915
83050 Toulon CEDEX

Résumé

DGA Techniques navales, dans son rôle de soutien technique au service des Programmes Navals, doit être capable d'évaluer le niveau de discrétion acoustique de projets de systèmes ou de navires proposés par le Service Industriel. Pour cela, il dispose de moyens physiques ou numériques de modélisation permettant de s'assurer que les performances requises de discrétion acoustique seront atteintes à partir des solutions proposées. L'analyse des simulations et évaluations est de nature à mettre en évidence les points jugés critiques par la Direction de Programme et qui feront l'objet d'un traitement par la maîtrise d'œuvre.

Abstract :

*Project acoustic signature management
DGA Techniques navales, within its function of technical support to the Naval Programmes Department, must be able to estimate the ship silencing level of projects about systems or ships suggested by the Industrial Department. To do so, there are some physical or numerical means at its disposal to work on models to make sure that the required performance about ship silencing will be reached from the suggested solutions. The analysis of simulations and estimates is able to emphasize the points that the Programme Direction can think critical and that will be treated by the Work Command.*

Introduction

Les exigences de discrétion acoustique

Pour un sous-marin ou un bâtiment de surface de lutte anti-sous-marine, la recherche de la discrétion est liée essentiellement à la diminution de sa vulnérabilité, mais aussi au souci de se placer dans une situation favorable à l'emploi de ses armes. Dans les deux cas, la discrétion acoustique est une réponse à la détection acoustique passive de l'adversaire.

Chaque type de sonar peut être caractérisé, en termes de performances, par une gamme de fréquences de travail ainsi que par un seuil de détection. Parmi les sonars les plus courants, on peut citer par ordre de fréquences croissantes, et pas nécessairement par risque croissant, les mines, les systèmes de surveillance stratégiques (type SOSUS), les sonars passifs d'écoute très basse fréquence, les bouées aéronavales, les sonars passifs de sous-marins, les sonars actifs utilisés en mode passif (coque, remorqué...), les sonars de torpilles, ..etc.

L'ensemble de ces moyens de détection couvre une gamme de fréquences allant de quelques Hz à quelques dizaines de kHz.

C'est la mutation profonde des moyens de détection, dont les performances se sont considérablement accrues au cours de ces dernières décennies, qui a imposé la recherche d'une plus grande discrétion acoustique pour les navires, et notamment les sous-marins, non seulement pour leur conserver une quasi-invulnérabilité, mais aussi pour leur donner une capacité de porter une attaque avec une chance raisonnable d'y survivre.

Le niveau de discrétion acoustique à atteindre pour un navire futur se déduit donc des performances de détection atteintes par les différents systèmes d'écoute auxquels il sera confronté lors des diverses missions qu'il aura à mener pendant son cycle opérationnel. Tout ceci se traduit, dans le cadre d'un nouveau programme de navire, par la définition de courbes de niveaux de bruit rayonné à respecter en fonction de la fréquence. Ces courbes, dénommées niveaux objectifs de bruit rayonné du navire, constituent la spécification de discrétion acoustique du navire.

La discrétion acoustique est donc une performance à part entière du navire au même titre que les autres performances ; elle est quantifiable et mesurable.

Les spécificités des programmes de navire

Considérations générales

Comparés à la plupart des autres types de programmes d'armement conduits par la DGA, les programmes de navires présentent les particularités suivantes :

- une série très faible, une production étalée dans le temps, et des écarts de définition parfois significatifs au sein de la série ;
- un ensemble de grands systèmes fortement intégrés ;
- pas de prototype d'ensemble, mais des qualifications partielles de sous-ensembles, physiques ou fonctionnels, reposant sur la simulation, l'analyse de données techniques antérieures, des essais représentatifs, ou plus globalement sur des programmes d'évaluation utilisant des plates-formes ou sites d'intégration à terre.

Les essais *in situ* de qualification du navire complet ne peuvent naturellement s'effectuer que sur le premier navire du type, ce qui rend le processus de mise au point et la maîtrise des configurations particulièrement critique et délicate.

Les exigences de discrétion acoustique n'échappent pas aux difficultés induites par ces spécificités, et sa maîtrise n'en revêt que plus d'importance.

La prise en compte de la discrétion acoustique

D'une manière générale, la maîtrise de la discrétion acoustique dans un programme de navire requiert :

- des objectifs initiaux clairs : ils sont fixés en fonction de la menace, à moyen et long terme, représentée par les moyens de détection acoustiques passifs et actifs;
- des moyens d'action, à la conception et à la réalisation, pour atteindre ces objectifs;
- des moyens pour vérifier que ces objectifs sont atteints ou pour identifier les lacunes résiduelles, et ceci à toutes les phases du programme;
- des moyens d'action pour garantir que les performances atteintes seront préservées en service;
- des personnels formés et en nombre suffisant pour assurer l'ensemble de ces tâches.

Il est utile de rappeler que durant les années 1970, faute de méthodes quantitatives suffisantes d'aide à l'évaluation en particulier au stade de la conception, les objectifs de discrétion acoustique étaient parfois difficilement maîtrisables dans la conduite du projet. Les moyens d'action restaient fondés trop exclusivement sur l'empirisme et le retour d'expérience de réalisations antérieures. Les moyens de vérification des performances existaient (polygones d'écoute), mais compte tenu de ce qui vient d'être dit, le passage du premier sous-marin du type sur polygone acoustique constituait la première donnée globale et objective sur le bruit rayonné, exigeant ensuite une longue analyse pour localiser les sources de bruit afin de définir, lorsque cela était possible, les modifications curatives souvent très onéreuses.

Il est donc indispensable si on veut minimiser les risques d'indiscrétion dans un programme de navire de définir une démarche, applicable aux différents stades du programme, visant à maîtriser les performances de

discrétion acoustique et à se doter des outils d'évaluation des différentes solutions envisagées.

Au préalable, il convient d'énumérer, d'une manière très générale, les principales sources de bruit d'un navire afin de donner un aperçu de la complexité du problème.

Les principales sources de bruit

Le niveau de bruit rayonné d'un navire résulte des contributions de trois types de sources majeures :

- le propulseur (1),
- l'interaction entre l'écoulement et la carène (2),
- les sources internes et en particulier les machines tournantes (3).

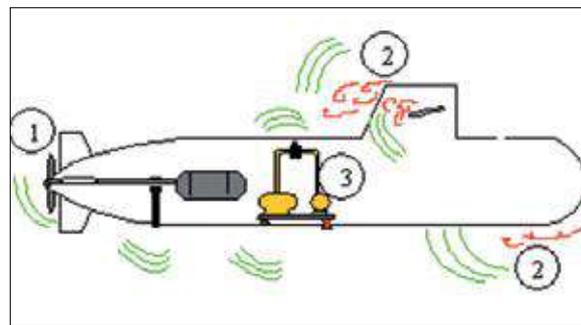


Fig. 1 : Les principales sources de bruit rayonné d'un s/m
Submarine main radiated noise sources

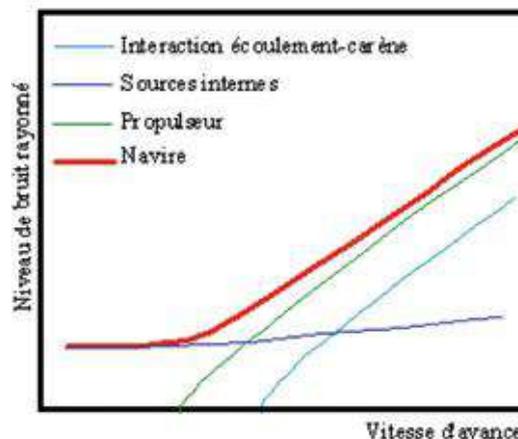


Fig. 2 : Exemple de contribution des principales sources de bruit
Example of radiated noise contributions of main sources

Le propulseur

Il constitue, aux vitesses élevées, la source majeure de bruit rayonné du navire :

- en basse fréquence, il est à l'origine d'un bruit de raies engendré par la rotation des pales dans un sillage non uniforme, perturbé principalement par les barres de plongée et de direction.
- en moyenne et haute fréquence, il génère des bruits large bande avec l'apparition éventuelle de phénomènes de cavitation.

L'interaction écoulement-carène

L'action de l'écoulement sur les structures et les ouvertures induit deux types de bruit, à savoir :

- un bruit large bande dû à la réponse vibratoire de la carène, en moyenne et haute fréquence, excitée par l'écoulement et dont le niveau augmente fortement avec la vitesse du navire,
- des bruits de raies, apparaissant à certaines vitesses et provenant d'accrochages hydro-élasto-acoustiques de modes propres de structures, localisées en moyenne fréquence, ou pouvant intéresser la coque dans sa globalité en basse fréquence.

Les sources internes

Aux faibles vitesses, les sources internes restent prépondérantes dans la signature en bruit rayonné.

Le terme « sources internes » regroupe essentiellement :

- les machines tournantes générant principalement des bruits de raies liées à leurs caractéristiques cinématiques,
- les écoulements dans les circuits hydrauliques ou aérauliques créant des bruits large bande amplifiés parfois par la présence de singularités.

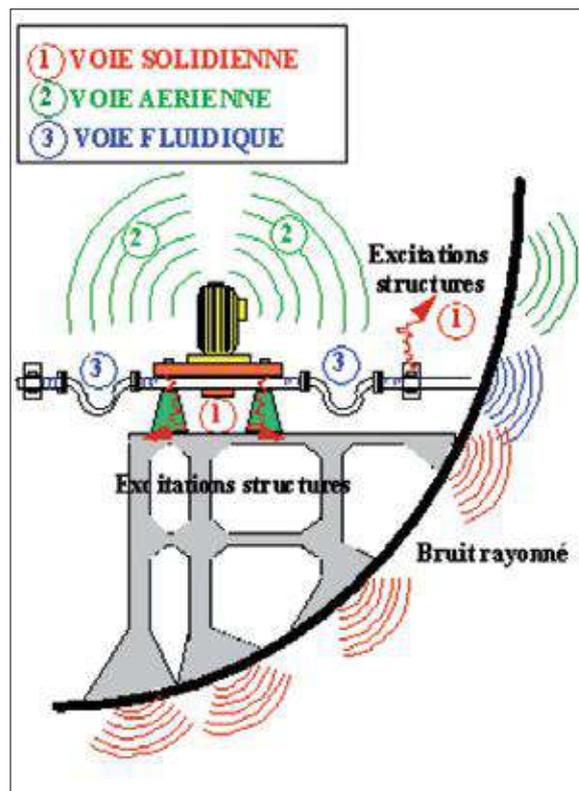


Fig. 3 : Sources internes : les différentes voies de transmission
Internal sources : different transmission paths

L'énergie vibro-acoustique produite par la source a, d'une manière simplifiée, trois possibilités de se propager jusqu'à la coque qui constitue, généralement, le radiateur acoustique ultime :

- par voie solide, les vibrations se propageant au travers des structures qui supportent les matériels,

- par voie aérienne, sous forme de fluctuations de pression se propageant dans l'air jusqu'à la coque,
- par voie fluide, sous forme de fluctuations de pression se propageant dans les circuits jusqu'à la coque ou à la mer dans le cas de circuits débouchant.

Il est à noter qu'il existe, pour la voie fluide, des couplages forts avec les structures des conduits, ce qui induit parfois, en aval, une transmission par voie solide.

Démarche adoptée pour maîtriser la Discrétion Acoustique

Compte tenu de la complexité et la multiplicité des mécanismes de génération de bruit dans un navire, il est nécessaire de définir une démarche visant à atteindre les exigences de Discrétion Acoustique d'un bâtiment en minimisant les risques et en maîtrisant les coûts et les délais. Cette démarche, décrite ci-après, se traduit par un ensemble de tâches se rapportant aux différentes phases d'un programme de navire telles que définies par les documents en réf. [1] à [5].

Démarche générale

Le processus mis en œuvre est reconduit durant les phases suivantes : faisabilité, définition, développement et production. La phase d'utilisation nécessite une démarche différente compte tenu du fait qu'il ne s'agit plus d'atteindre des objectifs mais de maintenir les performances en l'état.

Ce processus itératif consiste à estimer autant que faire se peut le « devis de bruit » du bâtiment en fonction du degré d'avancement du programme, afin d'identifier les points critiques et d'y remédier.

On appelle « devis de bruit » l'évaluation du niveau de bruit rayonné du navire (ou d'un de ses systèmes) à partir d'un état détaillé des contributions de chacun de ses constituants.

Les principales étapes de ce processus itératif sont les suivantes :

Établissement de la liste des sources potentielles de bruit

Pour un programme donné, une liste adaptée des sources potentielles de bruit est établie par les experts du domaine.

La décomposition technique du bâtiment en systèmes majeurs permet d'allouer à chacun de ces systèmes un Niveau Objectif de Bruit Rayonné (NOBR). Cette décomposition est proposée par l'architecte naval. Par exemple, une décomposition en système peut être la suivante : l'appareil moteur, la chaufferie nucléaire (quant elle existe), le propulseur, l'ensemble des installations de sécurité plongée et d'habitabilité, la carène (coque et appendices),...

Évaluation et hiérarchisation des sources vis-à-vis du NOBR

Il s'agit d'appliquer une méthode d'évaluation de la nocivité pour chacune des sources élémentaires répertoriées, en prenant en compte notamment : les niveaux de bruit aérien et de vibration des matériels, les procédures de calcul des niveaux objectifs des matériels, les principes de montage, l'utilisation (ou non) de matériaux de masquage, etc...

Pour mettre en œuvre cette méthode, il est nécessaire de disposer d'informations descriptives de chaque source de bruit et de son architecture de montage associée. Ces informations sont issues tout d'abord du retour d'expérience, puis, en fonction de l'avancement du programme, des données spécifiques à chaque projet.

La liste des informations nécessaires à cette évaluation est établie pour chaque phase (exemple : type de propulseur, architecture de montage des auxiliaires, puissance/masse des matériels, etc...).

Synthèse du bruit rayonné prévisible pour identifier les points critiques

La synthèse peut être élaborée dans un premier temps par système, puis globalement pour l'ensemble du navire. Elle est réalisée d'abord par des outils numériques de simulation et d'évaluation. Puis elle est enrichie, au fur et à mesure de l'avancement du développement et de la réalisation, par des essais d'évaluation au niveau des matériels (sources de bruit), des systèmes (sur un banc d'essai spécifique), et globalement pendant les essais techniques réalisés au bassin, au mouillage ou à la mer par le port constructeur.

Elle permet au niveau des sources de bruit et des systèmes, d'identifier les points critiques, c'est-à-dire des dépassements éventuels par rapport aux allocations requises, ou au contraire des marges excessives, prévisibles ou constatées, qui pourraient induire des coûts injustifiés.

Traitement des points critiques

L'analyse des simulations et évaluations est de nature à mettre en évidence les points jugés critiques par la direction de programme. Le traitement de ces points critiques est de la responsabilité du maître d'œuvre.

La démarche générale présentée au chapitre précédent s'applique à tous les stades du déroulement du programme avec quelques variantes propres à chacune des phases.

Quelques moyens d'évaluation des sources de bruit

Afin d'apporter son soutien technique aux Unités de Management, DGA Tn dispose d'outils d'évaluation et de simulation permettant de procéder à l'évaluation acoustique de systèmes ou de navires tout au long du déroulement d'un programme. Ces outils reposent sur des moyens de modélisation physique ou numérique des différentes sources de bruit.

Parmi tous ces outils, on peut citer :

- la maquette navigante MN2, destinée à l'évaluation des propulseurs de sous-marins et à la quantification des bruits dus à l'interaction entre l'écoulement et la carène, que DGA Tn met à disposition de DGA Techniques hydrodynamiques et des Unités de Management,
- l'outil de prévision du bruit rayonné CARMIN.

Utilisation de maquettes navigantes

L'un des plus gros moyens d'essais en discrétion acoustique de DGA Tn est le site de tractage et d'autopropul-

sion de maquettes navigantes de sous-marins, situé au lac de Castillon dans les Alpes-de-Haute-Provence. Unique en Europe, il permet la caractérisation acoustique et fonctionnelle des propulseurs ainsi que l'étude de sources acoustiques imputables à l'interaction entre l'écoulement et la carène.

Présentation du site d'essais

La partie du site d'essais du lac de barrage de Castillon utile aux essais sur maquette navigante est constituée de deux bases, est et ouest, situées sur les rives opposées. La première sert d'aire de lancement de la maquette, immergée à profondeur souhaitée. Entre elles est situé un polygone acoustique, à immersion réglable, destiné à mesurer les niveaux de bruit rayonné de la maquette qui le traverse. Les signaux issus des hydrophones sont alors récupérés en temps réel dans la salle de mesure et de pré-traitement de la base est. La géométrie du polygone acoustique est en similitude d'échelle avec ceux utilisés au réel. La base ouest, inopérante en version maquette autopropulsée assure le retour d'informations et sert de relais mécanique lorsque la maquette est tractée.



Fig. 4 : Le site d'essais acoustiques du lac de Castillon
Castillon lake acoustic test facilities

Sous certaines conditions (absence de pluie et de vent violent, turbine EDF à l'arrêt), ce site présente des niveaux de bruit de fond exceptionnellement bas.

Présentation de la maquette MN2

Pour permettre l'étude et l'évaluation de phénomènes acoustiques liés aux sous-marins, une maquette, dénommée MN2 (maquette navigante n°2), au 1/10e du SNLE « Le Triomphant » a été construite en respectant au mieux les règles de similitude (géométrie, structures et écoulement), de façon à, non seulement comparer entre elles des solutions technologiques (typiquement deux propulseurs), mais aussi pouvoir extrapoler à l'échelle 1 le résultat des mesures effectuées.

En fonction du type d'essai à effectuer, cette maquette peut être configurée suivant deux versions :

- autopropulsée pour l'évaluation des propulseurs,
- tractée pour l'étude des bruits d'origine hydrodynamique.



Fig. 5 : Maquette navigante MN2 (1/10 SNLE NG)
MN2 scale model (1/10 Le Triomphant SSBN)

Version autopropulsée

Dans ce cas, la maquette est autopropulsée par un moteur électrique, alimenté par batteries, qui entraîne la ligne d'arbre et le propulseur à tester par l'intermédiaire d'un réducteur.

Afin que la motorisation perturbe le moins possible, par des bruits parasites, l'évaluation acoustique du propulseur, les technologies les plus performantes en matière de réduction du bruit, généré et transmis par les machines tournantes, ont été mises en œuvre.

A chaque début de tir, la maquette est dotée d'un module programmé en fonction des paramètres d'avance du propulseur testé. Immersée par une plate-forme descendante à la profondeur du polygone, elle « obéit » alors aux consignes de tirs : la propulsion est mise en marche, la maquette est alors lâchée pour accélérer jusqu'à atteindre sa vitesse programmée. Son cap et son immersion sont maintenus constants par les barres de plongée et de direction corrigeant automatiquement, via la centrale de navigation, toute amorce de dérive. Elle traverse ainsi le polygone acoustique, parcourant la distance nécessaire à l'enregistrement des mesures acoustiques. Le moteur s'arrête alors automatiquement, déclenchant une chasse aux ballasts qui fait remonter la maquette, ramenée alors en surface vers la base est pour le tir suivant.

Version tractée

Lorsque l'on vise à étudier et à évaluer des bruits imputables à l'interaction de l'écoulement avec certaines parties d'un sous-marin (coque épaisse, ponts, massif, ouvertures de ballasts...), la maquette MN2 est privée de sa propulsion. On la tracte à vitesse programmée grâce à deux câbles.

L'un, attaché au dôme, assure le tractage et s'enroule sur un treuil situé sur la base ouest, l'autre, attaché à l'arrière de la maquette, se déroule d'un treuil base est et maintient en tension l'ensemble, assurant ainsi la maîtrise de la trajectoire. La maquette passe alors au droit du polygone acoustique, elle est ensuite ramenée à son point de départ par simple inversion du sens de rotation des treuils.

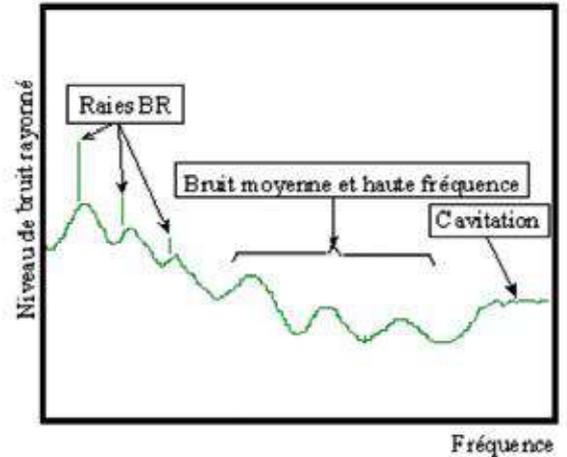


Fig. 6 : Spectre typologique de bruit rayonné d'un propulseur
Typical radiated noise spectra of propeller

Phénomènes étudiés

Propulseurs

Les principales causes d'indiscrétion d'un propulseur sont schématisées sur le spectre typologique exprimant le niveau de bruit rayonné en fonction de la fréquence.

- Les raies BR (« Blade Rate ») sont dues à l'inhomogénéité spatiale stationnaire de l'écoulement en entrée de propulseur. Principalement, c'est le déficit de vitesse au droit des barres de plongée et de direction qui induit des fluctuations de forces périodiques sur les pales, à leur fréquence de passage devant chaque zone déficitaire. Ces fluctuations de forces sont transmises, via la ligne d'arbre, les paliers et la butée, à la coque qui fait alors office d'émetteur acoustique plus ou moins efficace en fonction des coïncidences fréquentielles entre les raies BR1, BR2, ... et ses premiers modes propres.

Il va de soi que la représentativité des mesures de bruit rayonné sur maquette MN2 dépend tout autant de la similitude de l'écoulement en entrée de propulseur que de la similitude élastique des structures responsables du transfert des vibrations et de leur rayonnement.

Or, la similitude de l'écoulement ne peut être obtenue que sur maquette à l'échelle du réel. Dans le cas contraire, un des termes adimensionnels garantissant cette similitude doit être sacrifiée au profit des autres, jugés plus importants.

Pour l'étude des phénomènes précités, la conservation du nombre de Mach, rapport de la vitesse d'avance sur la célérité du son dans le fluide est impérative ($M=V/c$), ce qui impose de conserver à l'échelle de la maquette la vitesse d'avance réelle. La représentativité du fonctionnement de l'hélice est assurée par la conservation du paramètre d'avance J , rapport adimensionnel de la vitesse du bâtiment à la vitesse de rotation Ω du propulseur ($J = \frac{2\pi V}{\Omega D}$, D diamètre du propulseur). Le propulseur étant un modèle à l'échelle $1/h$, la vitesse de rotation en essais est donc augmentée d'un facteur h (égal à 10 pour MN2). La conservation du nombre de Strouhal, caractérisant les oscillations internes du fluide ($S = \frac{fD}{V}$, f étant la fréquence sonore) est assurée en multipliant la fréquence par un facteur h .

Toutefois, il apparaît que le nombre de Reynolds, ratio des forces d'inertie sur les forces de viscosité ($Re = \frac{VD}{\nu}$, ν viscosité cinématique) ne peut être conservé, privilégiant les effets visqueux sur le modèle, et affectant du coup le sillage des barres, l'écoulement sur les pales ainsi que les caractéristiques de la turbulence. Cependant, il est possible de démontrer numériquement que ce non-respect est marginal pour l'évaluation des phénomènes étudiés.

La similitude élastique des structures intervenant dans le processus de rayonnement des raies BR a été recherchée en reproduisant le plus fidèlement possible la ligne d'arbre, la butée, son carlingage ainsi que la coque. Pour chacun des constituants, les paramètres à conserver sont :

$$\frac{E}{\rho_s}, \frac{\rho_s}{\rho}, \nu_s \text{ et } \eta_s, \text{ où } E, \rho_s, \nu_s, \text{ et } \eta_s$$

sont respectivement le module de Young, la masse volumique, le coefficient de Poisson et l'amortissement de la structure.

- Le bruit en moyennes fréquences provient des vibrations des pales excitées par leur couche limite ou par les échappements tourbillonnaires. La forme et la position fréquentielle de ces phénomènes sont indépendantes de la vitesse. Leur émergence par rapport au fond de spectre diminue en hautes fréquences.

Il apparaît alors que la représentativité des mesures acoustiques sur maquette est indépendante de la structure de celle-ci. Elle est assurée par la similitude de l'écoulement au sein du propulseur et la similitude géométrique et élastique de celui-ci.

La similitude élastique est obtenue en réalisant les modèles dans des matériaux strictement identiques à ceux utilisés au réel ; seuls les modes de fabrication (pales rapportées sur modèle, propulseur monobloc au réel) peuvent induire une légère dérive sur l'amortissement structural η_s .

- Le bruit de cavitation résulte d'un phénomène de vaporisation de l'eau apparaissant lorsque la pression locale atteint la pression de vapeur saturante de l'eau. Elle se manifeste sous diverses formes dans toutes les zones dépressionnaires de l'écoulement ; son apparition est favorisée par les hautes vitesses et les faibles immersions. Elle s'amorce à partir de points faibles, les germes, qu'on peut assimiler à des microbulles en suspension. Les poches de vapeur ainsi générées sont convectées vers des zones de pressions plus élevées. Leur recondensation s'accompagne d'une implosion très énergétique, de rayonnement acoustique monopolaire, donc très efficace.

L'étude des phénomènes de cavitation de propulseurs est extrêmement complexe, les paramètres régissant l'apparition de ces phénomènes étant liés à l'environnement.

Leur liste (nombres de Thoma et de Weber, teneur en germes, taux d'oxygène dissous) montre clairement que les conditions de similitude sont largement imparfaites dans le lac de Castillon. De ce fait, la maquette MN2 ne peut être utilisée que pour comparer, entre divers propulseurs, la précocité d'apparition de la cavitation en fonction de la vitesse d'avance. Cette comparaison s'effectue

à partir de la détection de changement brutal de pente des spectres de bruit rayonné en hautes fréquences pour une certaine vitesse limite.

Bruits d'origine hydrodynamique hors propulseur

La liste des bruits d'origine hydrodynamique d'un sous-marin, hors propulseur, peut être scindée en deux grandes catégories :

- les bruits liés à l'écoulement seul, dits bruits directs,
- les bruits liés à l'interaction de l'écoulement avec tout ou partie du sous-marin.

De nombreux travaux montrent que le bruit direct est toujours négligeable en hydrodynamique navale. Son évaluation est sans intérêt, et serait quoi qu'il en soit impossible à l'aide de la maquette MN2 puisqu'il est indissociable des bruits d'interaction qui le masquent.

Les bruits dits d'interaction se décomposent en trois catégories :

- la diffraction par effet de bords,
- le rayonnement de structures vibrant sous l'action de l'écoulement,
- les résonances de cavité.

- Le mécanisme de diffraction par un bord de fuite d'un profil provient d'un phénomène de conversion de la zone convective des fluctuations de pression vers la zone acoustique. Cet apport d'énergie compense alors l'absence de rayonnement de la structure du profil, considérée rigide ; il est à l'origine d'un rayonnement de type dipolaire, relativement efficace.

Si la maquette MN2 se prête à l'étude de tels phénomènes, il est toutefois quasiment impossible de les dissocier des bruits imputables au rayonnement des structures vibrant sous l'action de l'écoulement : en effet, la pente fréquentielle des spectres de bruit rayonné et l'évolution de ceux-ci avec la vitesse d'avance sont très proches dans les deux cas. Le bruit de diffraction est donc noyé dans le bruit des structures.

- Le premier phénomène de rayonnement d'une structure vibrant sous l'action de l'écoulement provient de la coïncidence fréquentielle entre les lâchers tourbillonnaires au bord de la fuite d'un profil (barres, massif) et ses modes propres de vibrations.

Si les conditions de similitude d'écoulement permettent sur MN2 de reproduire l'excitation, il n'en est pas de même pour la réponse des structures, aucun appendice n'étant en similitude de structure sur la maquette. Celle-ci n'est donc pas employée à l'étude de ces phénomènes, dont la mise en évidence ne nécessite pas l'intégralité de la plateforme et conduit à prôner l'utilisation de moyens d'essais de type tunnel hydrodynamique.

- Le deuxième phénomène correspond au rayonnement de la coque et des superstructures (ponts, charpentes, massif) sous l'action de la couche limite turbulente et des perturbations engendrées à l'emplanture des divers appendices (massif et barres).

Dans ce domaine, la similitude de forme étant parfaite, la similitude de l'écoulement est respectée aux effets de Reynolds près, jugés négligeables, ainsi que l'absence d'effet de succion par le propulseur. Comme décrit au paragraphe 4.1.3.1, la coque est en similitude structurale quasi-parfaite, ainsi que les ponts, même si leur mode de fixation diffère légèrement par rapport au réel.

Ainsi, la maquette MN2 est le seul moyen disponible, à échelle européenne, permettant d'évaluer la contribution au bruit rayonné du bruit large bande d'origine hydrodynamique.

S'il est démontré plus haut la validité des mesures de ce type de bruit sur maquette, il convient de souligner l'extrême complexité de l'établissement des lois d'extrapolation au réel.

En effet, nos connaissances dans le domaine ne permettent qu'une description approximative des phénomènes mis en jeu. De ce fait, il est aujourd'hui illusoire de prédire par calcul ce type de bruit à partir d'une géométrie donnée sur plan. En revanche, les lois d'extrapolation sont établies en calculant, sur la base des modèles disponibles, les différences de niveaux d'excitation et de réponse à deux échelles distinctes. Leur résultante est alors rajoutée aux niveaux de bruit mesurés avec MN2. Cette démarche a été validée par des analyses spécifiques de mesures effectuées à l'échelle 1.

Enfin, la maquette est également utilisée pour évaluer l'influence sur le bruit large bande d'origine hydrodynamique de la forme et de la constitution de certains éléments : ponts, massifs, barres...

- Les bruits liés aux résonances de cavité relèvent de l'interaction de plusieurs phénomènes dénommée couplage hydro-élasto-acoustique.

L'excitation peut provenir tout autant de l'écoulement sur les profils de structures (couche limite ou lâchers tourbillonnaires) que des écoulements tourbillonnaires organisés à l'échelle de l'ouverture de la cavité. Le phénomène d'amplification peut provenir de la réponse de ces structures et des résonances acoustiques de la cavité. Cette description sommaire montre la difficulté à mettre en évidence ce type de bruit, les similitudes à respecter couvrant trois domaines (hydrodynamique, acoustique, structures) et à des échelles très variées.

Ainsi, si la maquette MN2 peut être considérée comme un des moyens les plus performants pour l'évaluation de ce type de bruit, il n'en demeure pas moins qu'elle doit être adaptée dans le détail pour approcher au mieux les bonnes conditions de similitude.

Exploitation des mesures effectuées

Tous les phénomènes physiques précités sont évalués en bruit rayonné en enregistrant à partir des hydrophones du polygone le passage de la maquette à vitesse stabilisée. Ces enregistrements sont ensuite analysés pour déterminer avec précision l'instant de passage au CPA (Centre du Polygone Acoustique) et la trajectoire de la maquette. Ces données étant déterminées, les enregistrements sont moyennés sur un angle de 90°. Ce dispositif est complété, notamment pour les essais en tractage, par une antenne focalisant l'origine du bruit et donnant accès à la répartition des zones rayonnantes sur la maquette.

Celle-ci possède également une instrumentation interne :

- des accéléromètres, répartis sur la coque en fonction du phénomène étudié, constituant un complément précieux à l'analyse des mesures de bruit rayonné,
- des hydrophones ou des capteurs de fluctuations de pression, qui peuvent être disposés dans les parties immergées à des fins d'études spécifiques (modes de ballasts, écoulement sur la charpente arrière ou sur les ponts),
- une antenne tractée en version autopropulsée qui donne des indications sur l'évolution des phénomènes lors du trajet de la maquette, et qui fournit une indication sur la directivité par l'arrière et prévient de l'apparition de la cavitation,
- des dispositifs de mesure de paramètres fonctionnels qui fournissent des données précieuses à la validation des propulseurs testés : puissance consommée, couple moyen, poussée fluctuante, et surtout paramètre d'avance par tour, indispensable à la validation des calculs numériques issus du Bassin d'Essais des Carènes.

Perspectives

La maquette MN2, initialement dédiée à la seule étude des indiscrétions liées aux raies BR, permet aujourd'hui, grâce au souci de DGA Tn, de faire évoluer pour répondre au mieux aux besoins exprimés, d'évaluer la plupart des phénomènes hydrodynamiques d'un sous-marin.

Dans le cadre des futurs programmes de sous-marin, pour lequel les performances acoustiques lors des phases de manœuvres revêtent une importance particulière, DGA Tn a fait évoluer les procédures de conduite de la maquette MN2 afin d'effectuer les mesures décrites au paragraphe 4.1.4 lors d'accélération, de décélération et de girations.

Les outils de spécification et de simulation pour les sources internes

La maîtrise des niveaux objectifs de bruit rayonné pour un projet de navire nécessite :

- en phase de définition, de répercuter les exigences globales de discrétion acoustique du navire sur chacune des sources potentielles de bruit, et en particulier les matériels internes, afin d'en établir la spécification en termes de niveaux "source",
- d'instruire et de mettre à jour, par la suite, un devis de bruit du navire en exploitant, en particulier, les mesures d'acceptation réalisées sur les matériels prototypes et/ou de série.

L'établissement des spécifications de discrétion acoustique des matériels

Pour un projet de navire, la démarche retenue peut être synthétisée de la manière suivante :

- établissement de la liste des sources potentielles de bruit du navire,
- définition d'allocations de bruit rayonné pour chacune des sources conformément à l'objectif global; ces allocations sont établies en tenant compte du nombre de sources potentielles et du retour d'expérience de programmes précédents.

- traduction des allocations de bruit rayonné en termes de niveaux à la source (vibrations, bruit aérien, fluctuations de pression). Cette répercussion à la source nécessite la connaissance des transferts vibro-acoustiques pour les trois types de transmission en tenant compte des conditions de montage des matériels à bord. Cette connaissance des transferts s'appuie en partie sur des bases de données spécifiques établies lors de programmes antérieurs ou sur des résultats issus de modélisation numérique ou physique.

- vérification de la faisabilité des exigences de niveaux à la source; cette étape est essentielle car elle a pour but de s'assurer que les niveaux spécifiés à la source et tenant compte des conditions de montage à bord sont effectivement accessibles. Elle ne peut être mise en œuvre qu'à partir d'une base de données relative aux niveaux vibratoires et acoustiques de matériels, base de données résultant de mesures faites selon une procédure permettant des comparaisons et des choix. Dans le cas où les niveaux exigés n'apparaissent pas accessibles, compte tenu de l'état de l'art, il est possible pour l'architecte naval d'optimiser le montage à bord, en rajoutant, le cas échéant, un étage supplémentaire d'isolation vibratoire ou acoustique, afin de minimiser les transferts et, par suite, de pouvoir admettre des niveaux plus élevés à la source.

Outil d'élaboration d'un devis de bruit pour un navire

L'établissement des exigences de discrétion acoustique pour les matériels, telle qu'elle a été décrite dans le paragraphe précédent, est indispensable, mais n'est certainement pas suffisante.

En effet, par la suite, il existera obligatoirement des écarts entre les niveaux spécifiés et les niveaux mesurés sur les matériels embarqués, des données de plus en plus précises sur les transferts vibro-acoustiques seront disponibles, que ce soit par le biais de modélisations numériques ou de résultats de mesure sur maquette ou sur moyens d'essais spécifiques. Toutes ces informations contribuent à préciser ce que sera le niveau de bruit rayonné du navire. Comme dans le cas de l'établissement du devis de masse d'un navire, il apparaît indispensable de se doter d'un outil permettant d'intégrer au fur et à mesure de l'avancement du programme l'ensemble de ces informations afin d'établir et de mettre à jour le devis de "bruit" du navire. Une équipe de projet peut alors disposer d'un tableau de bord lui permettant de suivre l'évolution de la signature d'un matériel, d'un système, d'un navire et d'être informé très tôt de l'existence éventuelle de dépassements ou de marges substantielles par rapport aux niveaux objectifs

Cet outil informatique, dénommé CARMIN (Calcul Acoustique du Rayonnement des Machines Internes), permet de calculer le niveau de bruit rayonné pour un projet de navire.

Initialement dédié au calcul de la contribution des sources internes, essentiellement les machines tournantes, dans le bruit rayonné global du navire, cet outil permet, depuis quelques années, de prendre aussi en compte, aux différentes vitesses, la contribution du propulseur et de la carène soumise à l'excitation de l'écoulement.

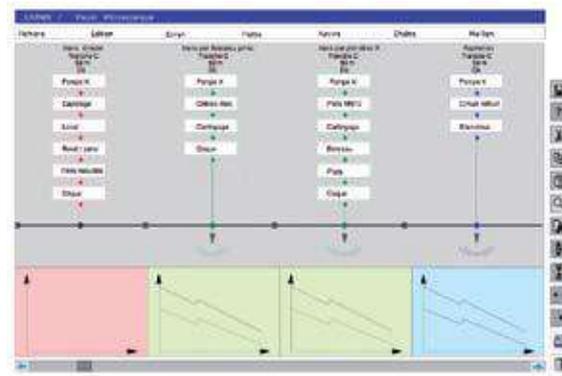


Fig. 7 : Logiciel CARMIN : Exemple de modélisation pour le calcul du bruit rayonné
CARMIN software : Example of modelling to compute radiated noise level

Compte tenu de la complexité du problème posé, la modélisation a été simplifiée afin de réduire les temps de calcul et le volume des données d'entrée; en particulier les calculs sont réalisés par bande de 1/3 d'octave et le niveau de bruit rayonné dans l'eau est un niveau moyen de pression rayonnée dans tout l'espace. Le bruit du navire est élaboré en cumulant les contributions de chacune des sources dans le bruit rayonné.

Pour chaque source interne, on peut prendre en compte les trois contributions élémentaires dues à la transmission par voie solidienne, par voie aérienne et par voie « fluide » au travers des circuits.

Pour un matériel et pour une voie de transfert donnée, la chaîne de transfert du bruit est décrite à l'aide de maillons élémentaires.

Le premier maillon, appelé terme « source », représente les niveaux d'excitation que ce matériel va appliquer à son environnement proche:

- pour la transmission par voie solidienne, il s'agit de niveaux vibratoires imposés par le matériel aux liaisons élastiques (supports élastiques, flexibles hydrauliques, etc...),
- pour la transmission par voie aérienne, la source est caractérisée par son niveau de puissance acoustique aérienne qu'elle génère,
- pour la transmission par voie « fluide », l'excitation, lorsqu'elle existe, est décrite sous forme de niveaux de fluctuation de pression créés dans les circuits.

L'ensemble de ces grandeurs d'entrée étant difficilement accessible au calcul, on utilise une base de données « dossier machines » constituée de résultats issus de mesures réalisées sur différents types de matériels (ventilateurs, compresseurs, pompes, baies électriques, turbo-alternateurs,...etc). Ces données peuvent être utilisées, par défaut, au début d'un programme; il est possible d'enrichir cette base en incluant des résultats issus de la qualification de prototypes ou provenant des essais d'acceptation des matériels de série.

Les maillons suivants représentent les différents éléments se trouvant sur le chemin de transmission du bruit; ces maillons sont propres au type de transmission (solidien, aérien, fluide). Ils sont caractérisés par des fonctions de transfert reliant les grandeurs physiques d'entrée et de sortie.

Certaines de ces grandeurs caractéristiques sont disponibles dans la base de données « dossier transferts » et proviennent de résultats de mesures ou de modélisation. Dans certains cas, il est possible de reconstituer la fonction de transfert d'un maillon à partir de données descriptives aisément accessibles et/ou d'approximations ayant fait l'objet d'une validation.

La grandeur de sortie du dernier maillon est un niveau de pression rayonnée dans l'eau.

Pour un matériel, le cumul des trois types de contribution (solidien, aérien, fluide) permet de reconstituer son niveau de bruit rayonné; leur comparaison permet de hiérarchiser la nocivité des trois types de transmission.

Un cumul des contributions des matériels constituant un système permet de reconstituer le bruit rayonné par ce dernier et de le situer par rapport à l'allocation de bruit initialement prévue.

Pour les propulseurs et la carène, l'estimation du niveau de bruit rayonné est effectuée à partir de résultats mesurés sur maquette à échelle réduite. Les niveaux à échelle 1 sont généralement déduits des résultats obtenus à échelle réduite en appliquant des facteurs correctifs (niveaux, fréquence) en tenant compte des règles de similitude des phénomènes physiques régissant les niveaux de bruit rayonné.

Les résultats obtenus sur modèle sont donc stockés dans une base de données propre au logiciel CARMIN. L'extrapolation à l'échelle 1 est donc faite en tenant compte de ce rapport de similitude. Ces niveaux de bruit rayonné sont généralement exprimés en fonction de la fréquence pour différentes vitesses d'avance du navire.

Le cumul des contributions des différentes sources permet de reconstituer la signature du navire et de la comparer au niveau objectif de bruit rayonné.

L'outil CARMIN constitue donc un outil d'analyse permettant, aux différentes vitesses, d'identifier les sources majeures de bruit rayonné ainsi que les voies prépondérantes de transmission du bruit pour les sources internes

Conclusions

La discrétion acoustique pour un nouveau programme de sous-marins ou de bâtiments de surface de lutte anti-sous-marin constitue une des spécifications majeures. Elle se traduit par une exigence globale exprimée par le niveau de bruit rayonné à respecter en fonction de la fréquence et de la vitesse du navire. Elle constitue une contrainte forte vis-à-vis de l'architecture du navire, du choix des équipements et de leur montage à bord.

Ce type d'exigence acoustique n'est pas propre au domaine militaire naval. On retrouve aussi des exigences vis-à-vis du confort acoustique que ce soit pour les navires à passagers (réf. [6]), pour les matériels ferroviaires (réf. [7]) ou bien encore pour les véhicules automobiles pour lesquels les aspects acoustiques deviennent primordiaux

aussi bien sur le plan du confort que vis-à-vis de la qualité perçue (réf. [8]).

Le recours à des outils de modélisation des phénomènes physiques bruyants et de gestion des performances acoustiques pour de nouveaux projets s'avère donc indispensable afin d'être capable de déterminer les niveaux qui pourront être atteints vis-à-vis des spécifications initiales de besoin.

Il y a une vingtaine d'années, l'effort a surtout porté sur l'utilisation de modèles physiques afin d'obtenir, à l'aide de mesures de fonctions de transfert, les grandeurs permettant de relier le niveau de bruit rayonné à un niveau d'excitation délivré par les sources. Cette démarche a permis de se doter de bases de données qui se sont avérées, par la suite, indispensables pour la validation de méthodes et d'outils de modélisation vibro-acoustique des structures. Les modélisations à partir de méthodes de type éléments finis sont aujourd'hui d'usage systématique pour des structures internes de supportage des matériels. Il est important de souligner que les données de mesures existantes ont été mises à profit pour définir au mieux les conditions aux limites et les valeurs de certains paramètres, comme le facteur d'amortissement, de manière à obtenir une bonne représentativité des modèles numériques.

Pour les structures immergées dans un fluide, le recours à des codes de type finis et éléments de frontière (BEM) a permis d'estimer les puissances et les pressions acoustiques rayonnées pour des sollicitations imposées.

Grâce à la forte montée en puissance des moyens de calcul informatiques, il est possible, à ce jour, de couvrir, à l'aide de modèles numériques, une gamme de fréquences allant jusqu'à quelques centaines de Hz pour une plateforme navale. En plus de l'approche de type Statistical Energy Analysis (SEA), l'avenir est certainement aux méthodes dites moyennes fréquences afin d'être capable, dans les prochaines années, de disposer d'outils de modélisation permettant d'accroître nos capacités de modélisation en haute fréquence et de couvrir ainsi l'ensemble de la gamme de fréquence d'intérêt.

Références bibliographiques

- [1] Guide pour la conduite des programmes d'armement - Edition 1995
- [2] Guide DGA/AQ 902 : méthodes de management de programme
- [3] Guide DGA/AQ 914 : glossaire des termes utilisés pour le management des programmes d'armement
- [4] Instruction Générale A01 SDPr - Révision A du 13/12/94 -Déroutement des programmes de navire
- [5] IM1514 Instruction générale sur le déroulement des programmes d'armement
- [6] « Acoustique et vibrations dans les navires à passagers » – S. Branchereau (STX) – Acoustique et Techniques n°64 (2011)
- [7] « Construction de modèles de synthèse acoustique de matériels ferroviaires » – N. Vincent, P. Bouvet (Vibratéc) - F. Poisson, T. Loizeau (SNCF) – Acoustique et Techniques n°37 (2004)
- [8] « L'acoustique des véhicules routiers » – B. Fabre (Renault) - E. Parizet (INSA) – Acoustique et Techniques n°42/43 (2005)
- [9] « L'acoustique et le transport ferroviaire » – P.E. Gautier (SNCF) – Acoustique et Techniques n°53 (2008)
- [10] « L'acoustique en aéronautique » – D. Collin – Acoustique et Techniques n°53 (2008)