

# Documentation du modèle de calcul de bruit de tir *sonARMS*

Version du programme: sonARMS Version 6.1.8 du 4 janvier 2026  
Nombre de pages: 34  
(annexes incluses)

## Table des matières

- 1 État des connaissances
- 2 Description des sources
- 3 Modèle de propagation
- 4 Construction et organisation de *sonARMS*
- 5 Résultats de calcul
- 6 Incertitudes du modèle
- Annexes

## Impressum

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Bruit et RNI, CH-3003 Berne  
Mandataire: Empa, Laboratoire Acoustique / Contrôle du bruit et Merz Technik  
Auteur: Jean Marc Wunderli  
Traduction initiale: Clémentine Cyprien, Genève et Triform SA, Fribourg  
Suivi au sein de l'OFEV: Kornel Köstli  
Conseil: Ce rapport a été établi sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).  
Le mandataire reste responsable du contenu présenté.

---

Dübendorf, 7 janvier 2026  
Chef de projet / chef du laboratoire:

Laboratoire Acoustique / Contrôle de bruit  
Chef de groupe d'acoustique environnementale:

Dr. Jean-Marc Wunderli

Dr. Reto Pieren

## Résumé

sonARMS est un modèle de bruit de tir qui permet la vérification du respect des 'Valeurs limites d'exposition au bruit des installations de tir civiles' selon l'annexe 7 OPB, ainsi que des 'Valeurs limites d'exposition au bruit des places d'armes, de tir et d'exercice militaires' selon l'annexe 9 OPB.

sonARMS comprend trois types de sources de bruit de tir : la détonation à la bouche, la détonation due à la trajectoire et la détonation à l'impact. Les valeurs d'émissions pour les détonations à la bouche et les détonations sont conservées dans une base de données sur les armes. Cette base comprend enregistrements d'armes civiles et militaires. Le niveau d'exposition au bruit lié à la détonation due au projectile est ensuite calculé sur la base de la balistique et des caractéristiques des projectiles.

Le modèle de dispersion est formulé en tiers d'octaves et prend en compte les phénomènes de propagation suivants : l'atténuation due à la géométrie, à l'air ou la forêt, l'effet du sol, les effets d'obstacles à bords horizontaux et verticaux, les influences météorologiques sur la propagation du son ainsi que les réflexions liées à des objets artificiels, à la forêt ou aux falaises.

sonARMS consiste en un noyau de calcul et une interface utilisateur. Le noyau de calcul décrit dans ce document restitue, sous forme de niveau sonore énergétique  $L_E$ , niveau sonore pondéré A, niveau sonore maximal pondéré A  $L_{Amax}$  et spectre sonore, un niveau de bruit de tir spécifique à toutes les combinaisons sources-récepteurs.

Le calcul des niveaux d'évaluation selon les annexes 7 et 9 OPB s'effectue directement dans sonARMS via l'interface utilisateur. Cette démarche est décrite dans un manuel annexe.

Le modèle sonARMS a été validé par de nombreuses mesures (voir rapport de l'Empa n°5211.01543.100-2). Toutefois, une incertitude significative de 3.7% a pu être constatée dans des situations spécifiques de propagation. Ainsi, les prédictions faites dans le cadre du respect des valeurs limites d'immissions selon les annexes 7 et 9 de l'OPB devront tenir compte d'un intervalle de confiance de 1-2 dB.

sonARMS a été développé par le laboratoire Acoustique / Contrôle de bruit de l'Empa en collaboration avec Merz Technik.

## Disclaimer / Avis de non responsabilité

sonARMS est un modèle de calcul développé par l'Empa, sur mandat l'OFEV, afin d'évaluer le bruit de tir militaire et civil selon l'OPB. Propriété de l'OFEV, il peut être obtenu gratuitement et est accessible à toute personne intéressée. Le programme est conforme à l'état actuel de la technique en ce qui concerne le calcul du bruit de tir. Un acousticien doit évaluer si les résultats sont plausibles. L'utilisation et l'interprétation des résultats sont de la responsabilité de l'utilisateur.

# 1 État des connaissances

Les limites d'exposition au bruit des places d'armes militaires, des places de tir et d'exercices ont fait l'objet d'une nouvelle annexe 9, modifiée dans le cadre de la révision de l'OPB et entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> août 2010. Afin d'établir le niveau d'exposition au bruit et planifier des mesures de protection par rapport à ces nouvelles limites, il a été décidé par l'OFEV, en collaboration avec l'Empa et armasuisse, de créer un modèle informatisé : *sonARMS*. Ce programme combine des éléments du modèle de calcul *WLO4*, utilisé précédemment pour le bruit de tir militaire, et du modèle *sonRAIL*, qui a été récemment développé pour le bruit ferroviaire<sup>1</sup>. À cette fin, l'OFEV (Division bruit /RNI), qui détient déjà les droits de propriété de *sonRAIL*, a également acquis ceux du modèle *WLO4* de l'Empa et financé les travaux liés à l'extension du noyau de calcul de *sonRAIL* en vue de son application au bruit de tir.

L'OPB régit le bruit de tir non seulement selon son annexe 9 nouvellement promulguée, mais également selon son annexe 7. Certaines installations devant être évaluées selon ces deux annexes et, étant donné qu'il est souhaitable d'utiliser un modèle de calcul uniforme pour toutes les sources de bruit de tir, le domaine d'application de *sonARMS* comprendra les activités militaires et civiles.

Le DDPS (département de la défense, de la protection de la population et des sports (ci-après : DDPS) est l'autorité d'exécution pour la mise en œuvre des nouvelles limites de bruit, conformément à l'annexe 9 OPB. Dans ce cadre, armasuisse Immobilier sera responsable du maintien d'un cadastre de bruit et de la mise en place des mesures d'assainissements nécessaires. Cette dernière a décidé de ne pas se charger de ces différentes tâches elle-même, mais de procéder à un appel d'offres. Ce dernier a initialement été remporté par la société Triform SA à Fribourg. Son mandat comprend, entre autres, l'acquisition des données de fonctionnement de toutes les places de tirs et d'armes, la modélisation et la représentation de l'exposition au bruit dans un système d'information géographique, ainsi que la mise en œuvre des mesures d'assainissement nécessaires. Triform SA a donc suivi le développement de *sonARMS* en tant que premier utilisateur du modèle, et contribué au niveau des interfaces entre le noyau de calcul et les étapes amont et aval (création de projet et préparation des résultats). En décembre 2010, le modèle de calcul *sonARMS*, version 1.1, ainsi que la documentation correspondante (23 décembre 2010, Empa n° 453'989) étaient livrés à Triform SA.

Grâce à la collaboration active et le cofinancement des services cantonaux de protection contre le bruit des cantons des Grisons et de Zürich, le noyau de calcul *sonARMS* a été complété par l'ajout durant les années 2011 à 2014 d'une interface graphique appelée *sonArmsGUI*. En effet, *sonARMS* avait été conçu, comme *sonRail*, pour une utilisation Standalone, accessible via une interface de ligne de commande. Cette nouvelle interface permet maintenant l'intégration automatique de données en provenance de systèmes d'information géographique, ainsi que la représentation, la modification et la gestion de projets concernant le bruit de tir. Parallèlement, la reconfiguration du noyau de calcul, effectuée sur la base des connaissances récoltées par le projet *sonRAIL-SpeedUp*, a permis une accélération conséquente de sa vitesse de traitement. De même, différentes corrections, améliorations et extensions lui ont été appliquées, ainsi qu'à ses données d'entrées et ses résultats. Le 15 octobre 2014, *sonARMS* version 3.0.1 a été téléchargé gratuitement sur le site de l'OFEV, mais a été remplacé le 31 octobre par la version 3.0.6a à cause de certains désaccords. En 2015, le noyau de calcul et l'interface utilisateur ont été encore développés de façon à intégrer une option langue française, ainsi que de la documentation traduite en français. La version du noyau de calcul correspondante 3.2.1 a été compilé le 28 mai 2015 et téléchargée sur le site de l'OFEV. Pour l'édition 4.4.0 du 12 septembre 2016, une modification du modèle de détonation due au projectile a été apportée en même temps que différentes améliorations et accélérations de l'interface utilisateur. Pour l'édition du noyau de calcul 5.0.0, une fonctionnalité supplémentaire qui permet la modélisation de chemins de son par voie d'ouvertures a été intégrée. En

---

<sup>1</sup>voir <http://sonrail.empa.ch>

plus, des améliorations ponctuelles des algorithmes de propagation ont été implémentés et une actualisation de la validation du modèle a été effectuée. La version actuelle du noyau de calcul 5.6.0 contient d'autres corrections d'erreurs et optimisations, voir à ce sujet le document "sonARMS Versions 2023 V5.6" (uniquement en allemand).

Cette documentation contient une discussion sur la version actuelle du modèle de calcul sonARMS, ainsi qu'une illustration de son fonctionnement et de ses différentes commandes. Pour des informations plus détaillées concernant le modèle de propagation, veuillez consulter la documentation *Dokumentation\_sonX\_2023.pdf*. Le modèle de calcul a été publié en 2012 sous le titre suivant «The Swiss shooting sound calculation model *sonARMS*» dans *Noise Control Engineering Journal* (Vol. 30, Issue 3). L'interface utilisateur a été intégrée dans un document séparé.

Le modèle de calcul ainsi que l'interface utilisateur associée et la documentation sont quant à eux disponibles en téléchargement sur le site Internet de l'OFEV. Tous les documents sont également disponibles sur le site de l'Empa sous <https://www.empa.ch/web/s509/sonarms>.

## 2 Description des sources

*sonARMS* comprend trois types de sources de bruit de tir: la détonation à la bouche, la détonation due à la trajectoire et la détonation à l'impact.

### 2.1 Détonation et détonation à la bouche

La catégorie détonation et détonation à la bouche regroupe les détonations telles que l'explosion de grenades ou les dynamitages qui, n'ayant pas de données balistiques, sont définies seulement par leurs coordonnées. Des détonations peuvent également avoir lieu en fin de trajectoire, que ce soit au niveau de l'impact ou de l'amorçage de l'explosion de la munition dans l'air. Ces détonations sont alors modélisées en tant que source ponctuelle sans direction. Dans ce cas, un niveau sonore énergétique  $L_S^2$  est défini par tiers d'octave de 25 Hz à 5 kHz.

Des coups de feu et autres événements semblables sont, pour leur part, définis par deux coordonnées présentant les positions de la bouche, au début de la trajectoire, et de la cible, à sa fin. La détonation à la bouche se produit au niveau de l'arme même. Celle-ci est modélisée comme une source ponctuelle sans direction, également par tiers d'octave de 25 Hz à 5 kHz. La directivité  $D_c$ , en fonction de l'angle d'émission  $\varphi$ , formé entre la direction de tir et de propagation, est représentée par une série de Taylor selon l'équation 1 ci-dessous. Selon cette définition, il est considéré que la directivité de la détonation à la bouche est symétrique par rotation à la direction de déplacement. Le terme  $L(\varphi)$  dans l'équation 1 représente ici le niveau sonore énergétique qui se manifeste dans la direction de propagation  $\varphi$ .

$$L(\varphi) = L_S + D_c(\varphi) = L_S + A + B \cdot \cos[\varphi] + C \cdot \cos^2[\varphi] + D \cdot \cos^3[\varphi] + E \cdot \cos^4[\varphi] \quad (1)$$

Le niveau sonore énergétique  $L_S$ , ainsi que les paramètres A à E de la directivité ont été déterminés par des mesures pour chaque source de détonation à la bouche. Ces données se trouvent dans la base de données d'armes évoquée au chapitre 3.

### 2.2 Détonation due au projectile et balistique

Si le tir a une vitesse supérieure à celle du son, la détonation due au projectile est considérée comme étant une source supplémentaire. Le niveau des émissions de la détonation due au projectile est calculé selon la

---

<sup>2</sup>S signifie 'source'. Le niveau d'énergie acoustique correspond au niveau de puissance acoustique d'un son prolongé. En comparaison aux valeurs à une distance référence d'un mètre, le niveau d'énergie acoustique est supérieur de 11 dB.

norme ISO 17201-4. Les données d'entrée selon la norme ISO sont : le diamètre du projectile (calibre), la longueur du projectile (mesurée de sa pointe jusqu'à son plus grand diamètre), la vitesse instantanée ainsi que la perte instantanée de vitesse du projectile. En 2016, une modification du modèle a été implémentée basée sur des comparaisons avec des mesures qui montraient une tendance de surestimation des immissions. Dès la version 3.2.1, la longueur du projectile est multipliée par un facteur de 1.7 ce qui correspond à une réduction des émissions de 1.8 dB(A).

La définition de la trajectoire peut être effectuée de deux manières dans le modèle. Pour les armes militaires, le modèle de balistique armasuisse  $W+T^3$  peut être utilisé. Les armes et les munitions sont identifiées en spécifiant 3 paramètres (N° Gun, N° Shell et N° Charge)<sup>4</sup>. Sur la base des positions et des coordonnées de cibles prédéfinies, les trajectoires correspondantes peuvent être évaluées. Une autre alternative consiste à estimer la trajectoire sur la base de la vitesse de sortie du projectile à la bouche et d'une perte constante de vitesse par mètre. Avec cette méthode simplifiée, adéquate pour des utilisations civiles et des distances de tir relativement courtes, une trajectoire rectiligne est alors considérée.

Le module balistique d'armasuisse génère un message d'erreur et interrompt le calcul en cours lorsque la cible n'est pas atteignable parce que la bouche et la cible sont, soit trop proches l'une de l'autre, soit trop lointaines. C'est souvent le cas pour les tirs aux fusils d'assaut réalisés sur de courtes distances. Ici, il est conseillé de choisir l'autre alternative afin de définir une trajectoire. Si la cible est trop éloignée selon le module balistique, cela signifie que les coordonnées sont incorrectes ou que l'arme, ou encore les munitions, n'ont pas été saisies correctement. Dans ce cas, la charge doit généralement être augmentée pour l'artillerie et les tirs de mortier.

Selon la norme ISO 17201-4, la spécificité du modèle de détonation due au projectile réside dans le fait que l'emplacement de la source de la détonation est déterminé individuellement pour chaque point de réception. Une approche alternative a été choisie lors de l'implémentation dans *sonARMS* afin de maintenir le concept de *sonRAIL* séparant les calculs d'émissions et de dispersion. Pour ce faire, la trajectoire a premièrement été divisée en points équidistants. La distance standard choisie étant de 2m. La trajectoire du projectile se termine alors soit à la cible en atteignant la vitesse du son, soit en impact au sol. Dans ce dernier cas, un message d'avertissement s'inscrit dans le journal contenant l'historique des événements. L'emplacement (X / Y / Z), la durée (T) et la valeur des émissions  $L_E$  sont calculés, pour chaque source, selon la norme ISO 17201-4 (les équations pertinentes de la norme ISO 17201-4 sont résumées en annexe). Le spectre de la détonation due au projectile est calculé selon la norme ISO 17201-4 à une distance de référence de 1m. Cette étape est réalisée pour toutes les sources, avant que la modélisation de la propagation ne soit exécutée; ceci afin de détecter d'éventuelles erreurs commises à ce niveau et définir la direction de la bouche de détonation, utilisée ensuite dans le calcul de la détonation due au projectile.

Dans une deuxième étape, il est vérifié pour chaque point récepteur et chaque source avec détonation due au projectile, si la détonation se manifeste au récepteur donné, et si oui, quels points de trajectoire équidistants sont les plus proches du point de détonation. (Cette identification se base sur une analyse temporelle, étant donné que le son provenant d'une détonation due à un projectile arrive toujours en premier au point récepteur.) Ces combinaisons source-récepteur sont alors mises en évidence dans une matrice. Un calcul de propagation ultérieur n'est effectué que pour ces combinaisons particulières.

Remarque: La norme ISO 17201-4 se base uniquement sur des trajectoires droites. Par conséquent, il a été supposé que les projectiles subissent tous une perte de vitesse sur leur trajectoire et que toute accélération

---

<sup>3</sup>Le module balistique d'armasuisse n'est pas public et ne peut être utilisé systématiquement. La version civile de *sonARMS* est livrée sans module balistique.

<sup>4</sup>Le module balistique permet également de choisir le type d'angle de tir ainsi que l'atmosphère (pression et température en fonction de l'altitude). Ces paramètres sont cependant fixés dans *sonARMS*: à l'exception du lance-mine (mortier), les tirs sont modélisés comme des tirs plongeants et des conditions d'atmosphère standards sont utilisées.

est exclue. Une accélération peut cependant être possible lorsque l'angle de tir présente un angle élevé (tir vertical) ou lorsque la cible est située bien plus bas que le tireur. Dans le cas d'un tir balistique vertical, le projectile ralentit au sommet de sa trajectoire pour accélérer de nouveau. Dans *sonARMS*, cette trajectoire va être suivie seulement jusqu'au moment où le projectile atteint une vitesse subsonique. Une nouvelle accélération n'est ensuite plus prise en compte dans le calcul de la détonation due au projectile. Inversement, si la balle ne perd pas en vitesse, ou accélère même du fait de sa géométrie, un taux de décélération minimal sera intégré dans les équations de la détonation au projectile pour éviter les discontinuités (voir annexe 1). Les armements à propulsion ne peuvent ainsi pas être modélisés.

## 2.3 Base de données des armes

Toutes les informations nécessaires au calcul des émissions ont été classées dans une base de données des armes. Celle-ci se trouve sous la forme d'un fichier ASCII, comme l'ensemble des autres données nécessaires. En plus des informations sur la balistique et des données d'émissions mesurées ou calculées de détonations ou de détonations à la bouche, la provenance de ces données y est aussi mentionnée. Des indications quant aux utilisations typiques sont fournies à l'utilisateur sous « remarque ». Les documents sont classés selon les catégories ci-dessous. Le nombre d'enregistrements par catégorie stockés dans l'actuelle base de données, état du 19 septembre 2025, est indiqué entre parenthèses :

### Militaire

1: armes d'infanterie (34)

2: lances-mines (36)

3: blindés (9)

4: artillerie (14)

5: DCA (2)

6: Canons d'avions (6)

### Civile

11: armes à feu portatives

(cartouche à percussion centrale) (15)

12: armes à feu de poing

(cartouche à percussion centrale) (14)

13: armes à feu de poing

(cartouche à percussion annulaire) (5)

14: armes à feu portatives

(cartouche à percussion annulaire) (5)

15: fusils de chasse (cartouches à balle) (9)

15: fusils à grenaille (21)

Cette catégorisation facilite la sélection au niveau de l'interface utilisateur de *sonARMS* et est semblable à celle utilisée dans l'annexe 7 de l'OPB. Ce classement est également utilisé pour le calcul des niveaux d'évaluation partiels par catégorie d'armes conformément à l'annexe 7. En plus de chaque arme, une valeur médiane représentative est indiquée pour chaque catégorie d'armes selon l'annexe 7. Les données d'émissions pour les armes militaires (catégories 1 à 5) ne sont pas livrées avec la version civile de *SonArms*. Ainsi, les armes utilisées indifféremment dans un cadre civil et militaire sont saisies deux fois dans la base de données complète. Les armes saisies deux fois sont signalées d'une étoile dans la version civile sans balistique.

La majorité des informations de la base de données des armes *sonARMS* provient du modèle *WL04*. Cependant, un transfert direct n'était pas possible, puisque non seulement la base de données des armes *WL04* est exprimée en octaves au lieu de tiers d'octaves, mais aussi une distance de référence d'un mètre a été utilisée. La conversion des données a été effectuée au cas par cas selon le type de source :

#### ▪ Détonation à la bouche

Dans *WL04*, différentes méthodes existaient pour décrire la directivité (en série de Taylor et de Fourier) et indiquer les valeurs pour des angles discrets. Dans *sonARMS*, ces approches sont combinées et standardisées (voir équation 1).

Les émissions sont déterminées, selon *WL04*, en 15 étapes en tenant compte des informations concernant la directivité. Enfin, les bandes d'octave sont transformées en tiers d'octaves de 25 Hz à 5 kHz via interpolation. Sur cette base, la force de la source ainsi que la fonction de directivité sont évaluées pour chaque tiers d'octave selon l'équation 1 en utilisant la méthode des moindres carrés.

#### ▪ Détonation due à un projectile supersonic

Puisque *sonARMS* utilise une nouvelle base de données balistiques, les réglages des paramètres correspondants ont dû être modifiés toutes les armes militaires avec balistique.

#### ▪ Détonation à l'impact

Toutes les données existantes ayant des caractéristiques liées à une détonation sont converties selon des spectres de Weber idéalisés (voir ISO 17201-2). Le critère d'optimisation choisi est une déviation moyenne minimale pour chaque octave.

Pour les systèmes d'armement dont les projectiles explosent à la cible, la quantité d'explosif libérée dans l'air lors de la détonation a été déterminée en collaboration avec armasuisse W+T. À partir de cette valeur, un spectre des émissions a ensuite été déterminé à l'aide du modèle Weber.

#### ▪ Valeurs médianes pour les catégories d'armes selon annexe 7 OPB

La base de données des armes *sonARMS* contient tous les types d'armes qui ont été considérés dans le cadre de la révision de l'annexe 7 OPB, ainsi que les valeurs médianes, basées sur la pondération précédente, par catégorie d'armes. Pour la catégorie f (carabines), deux valeurs médianes ont été évaluées : l'une selon une variante légère, pour des plombs pesant jusqu'à 30 g pour une utilisation sportive, et l'autre, selon une variante standard, avec des plombs pesant jusqu'à 36 g pour une utilisation mixte (chasse / sport). Étant donné que, dans le cadre de l'annexe 7 OPB, les valeurs médianes comprennent également une partie non négligeable de fusils de chasse, utilisés uniquement par les militaires et la police, elles ne sont pas représentatives de l'utilisation purement civile (intitulé « Médianes catégorie d'armes f (fusil à grenaille inclus arme à fonctions multiples ) »).

#### ▪ Tunnels antibruit et écrans latéraux aux lignes de tir

Le modèle *WL04* a déjà utilisé des données spécifiques qui intégraient l'effet de tunnels antibruit et d'écrans latéraux aux lignes de tir pour des installations de tirs de 300 m. Ces données ont été réévaluées pour le modèle *sonARMS*. En plus des données déjà existantes pour le Fass90 et le Fass57, des données d'émissions supplémentaires ont été établies pour un fusil standard, ainsi que pour la valeur médiane de la catégorie d'armes a).

La variable choisie pour déterminer l'effet d'écrans latéraux correspond à la réduction du niveau sonore en dB(A) en fonction de l'angle de tir, déterminé dans le modèle de bruit de tir *étendu SL-90*. Cet effet, étant comparable à celui d'un obstacle classique, la formule de Maekawa a pu être utilisée pour déterminer la réduction du niveau spectral en optimisant le chemin de déviation  $z$  de façon à obtenir la même réduction que celle obtenue du modèle de bruit de tir *étendu SL-90*.

Pour déterminer l'effet des tunnels antibruit, les approches en dB(A) selon le modèle de bruit *étendu SL-90* ont été utilisées. Cependant, la réduction du niveau de bruit due aux tunnels antibruit ne correspond pas à un effet d'obstacle d'un point de vue du profil spectral. De ce fait, l'Empa a déterminé l'effet spectral à partir de séries de mesures dont les caractéristiques directionnelles avec et sans tunnel de tir avaient été mesurées (voir rapport n° 417'078 de l'Empa).

Dans le modèle de bruit de tir *étendu SL-90*, les valeurs d'émissions sont données pour un angle de rayonnement horizontal variant de 0 à 180°. Dans *sonARMS*, l'angle d'émission est déterminé de façon tridimensionnelle dans la direction du récepteur ou, en présence d'un obstacle, dans la direction de la première arête

de diffraction. Des angles d'émission supérieurs à 90° ne se présentent pas dans la pratique. En effet, l'existence d'écrans latéraux et de tunnels antibruit est généralement liée à un stand de tir. De manière similaire à la définition de source de détonation à la bouche, une symétrie par rotation à l'axe de tir est appliquée aux données de sources avec tunnels antibruit ou écrans latéraux.

### 3 Modèle de propagation

Le modèle de propagation intégré dans *sonARMS* est une variante dérivée du noyau de calcul *sonX*. Le domaine de fréquence a été fixé, pour les applications au bruit de tir, au tiers d'octaves de 20Hz à 5Khz.

Le modèle de propagation *sonX* est subdivisé en 4 modules. Le module de calcul BASIC est nécessaire à chaque calcul de propagation. Dans ce module, la propagation du son entre la source et le récepteur est calculée en coupe verticale, en partant de l'hypothèse d'une atmosphère homogène. Le calcul d'atténuations dues à l'air et la forêt se fait selon la norme ISO 9613. Le calcul des effets liés au sol est réalisé, contrairement à la norme ISO 9613, selon une approche considérant les réflexions d'ondes sphériques sur un terrain régulier et homogène. Le modèle a été amélioré pour traiter les terrains irréguliers et les caractéristiques de sol variées au moyen de l'ellipsoïde de Fresnel. Le modèle permet de prendre en considération les pertes de cohérence entre un son direct et les réflexions en fonction de la fréquence et la distance de propagation. En plus du chemin de son dans la verticale par-dessus des obstacles, *sonARMS* considère également des chemins de son latéraux et dès 2018 aussi des éventuels chemins de son par voie d'ouvertures.

Les autres modules peuvent être activés afin d'obtenir des résultats de calcul plus affinés. Ainsi, dans le deuxième module METEO, les effets des conditions météorologiques sur la propagation du son sont calculés. Les données d'entrée nécessaires à ce module sont la direction du vent, les profils verticaux du vent, la température et l'humidité qui peuvent aussi varier selon la nature du terrain. En premier lieu, l'influence de la météo sur la capacité d'absorption de l'air est évaluée. Puis, les profils de vitesse du son qui en découlent sont implantés dans un algorithme d'émissions de rayonnement sonore qui permet de déterminer les modifications dues à des effets d'obstacle ainsi que les zones d'ombre acoustique. La réduction du niveau sonore est ensuite dérivée des paramètres géométriques des rayons acoustiques, atteignant le récepteur le plus proche. En plus des situations météorologiques, des données statistiques liées à la météo peuvent être utilisées. Pour cela, plusieurs situations spécifiques peuvent être définies et complétées avec des données concernant leurs fréquences d'occurrence. Le résultat est ensuite donné sous la forme d'une moyenne énergétique, pondérée selon ces fréquences d'occurrence, pour chaque situation spécifique d'immissions calculées. Les pondérations de chaque situation météorologique pourront être définies séparément selon les périodes jour, soir, nuit déjà utilisés par *sonRAIL*.

Le troisième et le quatrième module traitent des augmentations du niveau sonore dues aux réflexions. Les réflexions causées par des bâtiments et autre objet artificiel sont déterminées par le module REFLECT, tandis que les réflexions diffuses dues aux lisières de forêt et de falaises sont calculées par le module FOREST.

Une description détaillée du modèle n'est pas fournie dans ce document. Une présentation complète de l'algorithme de propagation est disponible dans la documentation de *sonX* (sous <http://sonrail.empa.ch>). Dans les chapitres suivants, l'extension du modèle *sonX*, réalisée spécifiquement pour *sonARMS*, sera décrite. Davantage de détails sont également apportés dans la publication du journal *Noise Control Engineering Journal* (Vol. 30, Issue 3).

#### 3.1 Intégration de la directivité pour une détonation à la bouche

Le modèle de propagation *sonX* est formulé pour des sources ponctuelles sans direction. Selon la formule 1, la directivité pour des détonations à la bouche doit donc être considérée comme un facteur d'atténuation

supplémentaire. L'angle des émissions est déterminé par l'orientation de l'arme, en tenant compte de sa balistique et du chemin de son direct, y compris les éventuels obstacles.

Dans le cadre des effets liés au sol lors de l'interaction du son direct en phase avec les réflexions du terrain, la directivité joue en principe un rôle puisque, dans ce cas, chaque chemin de son présente un angle d'émissions propre.

Pour des cas typiques de propagation où la distance de propagation horizontale est bien plus importante que la hauteur relative de la source par rapport au sol les différents angles d'émissions divergent seulement légèrement les uns des autres. Il a donc été décidé de renoncer à reproduire cet effet dans le modèle et utiliser l'approche de sources ponctuelles sans direction pour le calcul des effets liés au sol.

Le même constat peut être fait pour le calcul des effets liés à la situation météorologique via le module METEO. La variation des angles d'émissions entre sons directs dans une atmosphère homogène et non homogène est si petite qu'aucune modification de la directivité n'est nécessaire pour le calcul par rapport à un calcul avec le module de base.

Dans les modèles avec réflexion, la propagation de la source jusqu'au centre de surfaces réfléchissantes est calculée dans une étape antérieure. Comme pour le cas du son direct, la fonction directivité, calculée à partir de l'angle de rayonnement, est considérée en tant qu'atténuation supplémentaire. Le modèle avec réflexion incohérent dans REFLECT présente l'avantage que le calcul peut être effectué pour toutes les fréquences en une fois (sans itération). Pour les sources avec directivité, la pondération de chaque tierce peut s'avérer différente selon l'angle d'émissions. De ce fait, le calcul de réflexion se fait en spectral. Afin de limiter le temps de calcul, un calcul séparé ne fait que par octave et non par tiers d'octave.

### **3.2 Détonation due à un projectile**

Dans la norme ISO 17201-4, trois domaines sont distingués. Le domaine II, comme le montre la figure 1, présente le domaine classique de détonation due à un projectile. Ce domaine est défini par le front de l'onde du cône de Mach. Le domaine I, également présenté sur la Figure 1, représente la zone en amont de la cible, tandis que le domaine III comprend la région derrière la cible. La norme fait état de formules de calcul de détonation due à un projectile pour les domaines II et III qui donnent des niveaux de bruit clairement inférieurs dans le domaine III. Sur la base de cette constatation, il a été décidé de ne pas implémenter cette partie de la norme pour les raisons suivantes : 1) le niveau sonore dans le domaine III n'est pas pertinent du point de vue des valeurs limites et qu'il est alors recouvert par la détonation et la détonation à la bouche, 2) ni le modèle de bruit de tir civil *sonGun* ni le modèle précédent de bruit de tir militaire *WL-04* n'ont implémenté de détonation due à un projectile dans ce domaine.

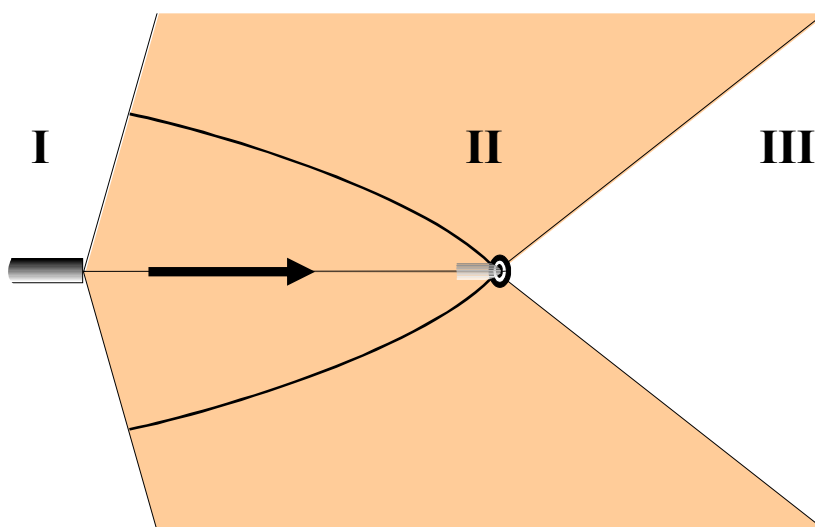


Figure 1 Domaines I, II et III de détonation dues à un projectile. Le début et la fin de la trajectoire sont représentés par la bouche et la cible.

Le modèle de détonation due à un projectile ISO 17201-4 utilise certains algorithmes spécifiques qui reproduisent le comportement comme sources linéaires cohérentes. Les différences suivantes sont relevées par rapport à l'algorithme standard du modèle de *sonX* :

- Une atténuation géométrique  $A_{div}$  séparée, selon la norme 17201-4, est utilisée.
- La réduction du niveau sonore due à un effet non linéaire  $A_{nlin}$ , selon la norme ISO 17201-4, est implémentée comme facteur d'atténuation supplémentaire
- En raison d'effets non linéaires, la forme et le spectre du signal de la détonation due à un projectile se modifient avec l'augmentation de la distance de propagation.

### Modification du modèle de la détonation due à un projectile

Des comparaisons avec des mesures en 2016 ont montré une tendance de surestimation des immissions. La même chose a été confirmé après consultation du développeur, Frank van den Berg de la TNO (NL). Des validations néerlandaises ont également trouvé une surestimation moyenne autour des 1.8 dB du  $L_{AE}$ , dont la cause est soupçonnée d'être la définition de la longueur du projectile, qui avait déjà été sujet de discussions lors du développement de l'ISO 17201-4. La longueur du projectile peut soit être définie comme la longueur du projectile effective, c'est-à-dire de la pointe au plus grand diamètre, soit la longueur du projectile totale. Tandis que le modèle néerlandais est basé sur la longueur du projectile effective, il existe aussi des contre-arguments disant que la longueur d'impact de la détonation due à un projectile doit être plus longue que seulement jusqu'au diamètre maximal, et ceci à cause d'effets de bord. Des comparaisons de différents types de munition civile ont montré qu'en moyenne il y a un facteur de 1.70 entre les deux longueurs. En accord avec l'OFEV, un facteur de 1.70 a été incorporé dans le calcul d'émission (cf. formule (5) dans les annexes), ce qui a permis de ne pas changer toute la base de données.

### Calcul de réflexions pour une détonation due à un projectile

Les atténuations supplémentaires, spécifiquement liées à une détonation due à un projectile, ne sont considérées que jusqu'au premier réflecteur en raison d'effets non linéaires. Il en va de même pour les atténuations géométriques dans le module REFLECT. Ceci vaut également pour les réflexions modélisées comme sources diffuses provenant du module FOREST (réflexions dues aux falaises et aux cimes des arbres). Ce n'est pas le

cas des réflexions dues au tronc qui sont considérées comme des réverbérations dans le modèle de réflexion de la forêt. Dans ce cas, l'atténuation géométrique pour une détonation due à un projectile est appliquée sur l'ensemble du chemin de propagation source-rélecteur-récepteur.

Etant donné que le modèle cohérent de réflexion REFLECT ne peut être utilisé dans le cas d'une détonation due à un projectile, un modèle incohérent sera utilisé pour ce type de source, indépendamment de la configuration du noyau de calcul. Dans ce type de modèle, un calcul en pas d'octaves est utilisé comme pour le cas d'une détonation à la bouche.

### 3.3 Corrections pour les effets latéraux d'obstacles $A_{lateral}$

Pour des sources linéaires, comme les voies ferroviaires et les routes, il suffit de considérer des chemins de propagation le long de coupes verticales. Dans le cas de sources ponctuelles pures, comme par exemple pour le bruit de tir, les chemins de propagation contournant latéralement un obstacle peuvent être significatifs. En effet, dans des situations où le chemin au-dessus de l'obstacle est plus long qu'un chemin latéral, les immissions seront davantage influencées par les chemins latéraux. Considérer uniquement les influences verticales amène ainsi à sous-estimer les immissions et surestimer l'effet de protection des obstacles. C'est pourquoi les chemins latéraux de propagation étaient déjà pris en considération dans le modèle précédent WL04, antérieur à sonARMS.

L'effet latéral d'obstacles est inclus dans sonARMS par le biais d'une correction du niveau sonore lors du calcul standard de sons directs par le module BASIC. La correction spectrale présente alors une augmentation, due à l'intégration de chemins de propagation contournant l'obstacle par la gauche ou par la droite. Le calcul de cette correction se déroule selon la procédure décrite ci-dessous. Celle-ci n'est appliquée qu'aux obstacles artificiels, puisqu'il a été considéré que les discontinuités naturelles de terrain ne peuvent pas présenter de brusques changements de hauteur.

1. Le paramètre d'atténuation  $A_{grbar,Tv}$ , qui n'intervient qu'en vertical de l'obstacle, est défini seulement si un terrain naturel est considéré (T pour terrain). L'effet d'un obstacle efficace sur la dimension verticale est déterminé, en tenant compte des variations des effets du sol, comme le paramètre d'atténuation  $A_{grbar,THv}$  lors du calcul d'un son direct. Il est alors reporté dans les résultats détaillés.
2. Tous les objets artificiels, interrompant la transmission directe entre source et récepteur, sont évalués. Le chemin de déviation  $z_{THv}$  est alors calculé pour un chemin de propagation du son vertical en considérant un terrain et des obstacles artificiels.
3. Les points d'intersection avec une transmission directe entre source et récepteur sont déterminés pour chaque objet artificiel. À cette hauteur, l'angle d'émissions menant à l'obstacle est recherché des deux côtés sur le plan horizontal. Ensuite, le chemin de propagation est défini comme le chemin conduisant latéralement autour de l'obstacle, de la source jusqu'au récepteur. Ainsi, on obtient les chemins sonores latéraux utilisés pour calculer les chemins de déviation, droite  $z_{Hl}$  et gauche  $z_{Hr}$ .
4. Pour chacun de ces 3 chemins de déviation, l'effet d'obstacle  $A_{bar}$  est calculé sans prendre en compte l'effet de la réflexion au sol. Dans ce cas, l'algorithme reprend les variantes déjà implémentées dans le module BASIC tout en prenant compte des effets d'obstacle.
5. Pour les trajets acoustiques latéraux, l'effet d'obstacle  $A_{bar}$  à 500 Hz est comparé à l'effet d'obstacle maximal selon le paramètre SingleBarrierMaxAtt. Si cette valeur est dépassée, ce trajet acoustique est considéré comme négligeable et ignoré pour les étapes suivantes.
6. La correction liée à l'effet latéral d'un obstacle  $A_{lateral}$  n'est calculée qu'en tiers d'octaves selon la formule 2 ci-dessous. La première ligne de l'équation détermine l'augmentation du niveau d'immissions en considérant également les chemins de propagation latéraux autour d'un obstacle artificiel, en comparaison avec le calcul standard effectué par le module BASIC. Pour des sources orientées et rayonnantes, il est également considéré que l'angle d'émission, et donc l'intensité de la source, diffèrent pour les 3 chemins de propagation.

Le critère de la deuxième ligne garanti que la présence d'un obstacle artificiel n'entraîne aucune augmentation du niveau sonore (la différence de  $A_{grbar,THv}$  et  $A_{grbar,Tv}$  doit en outre être supérieure ou égale

à zéro).

$$\begin{aligned}
 & -A_{\text{lateral}}(f) \\
 & = \text{Min} \left\{ \begin{aligned} & A_{\text{bar,THv}}(f) + 10 \cdot \log \left[ 10^{-0.1 \cdot A_{\text{bar,THv}}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{\text{bar,HI}}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{\text{bar,HI}}(f)} \right] \\ & A_{\text{grbar,THv}}(f) - A_{\text{grbar,Tv}}(f) \end{aligned} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Explication de la formule 2: Selon la ligne 1, le critère pour l'effet d'obstacle latéral comprend seulement l'effet d'obstacle sans les réflexions au sol, ce qui représente une simplification. En effet, la présence d'obstacles modifie également les chemins de réflexions, ce qui en conséquence aussi change les interférences entre le son direct et les différents chemins de réflexions au sol. Par exemple, une chute d'interférence significative dans une situation de modélisation sans écran, peut être supprimée en présence d'obstacles. Ainsi, l'effet final est celui d'une réduction du niveau sonore moindre par rapport au cas ne considérant que le chemin de déviation z. Dans les cas extrêmes, il n'est pas exclu que la présence d'un obstacle provoque une augmentation du niveau sonore dans des tiers d'octaves spécifiques.

Remarque: la correction pour les effets latéraux d'obstacles provoque exclusivement une augmentation des niveaux d'immissions. Selon l'ISO 9613, les phénomènes de propagation ne sont intégrés au modèle que sous forme d'atténuation. Pour *sonARMS*, la systématique de la norme a été reprise et la correction liée à l'effet latéral d'obstacles a également été définie en tant qu'atténuation. Ainsi, par définition,  $A_{\text{lateral}}$  ne peut que contenir des valeurs négatives. (Les effets du sol et de la météo peuvent également induire des atténuations négatives, ce qui provoque alors une augmentation du niveau des immissions).

**Précisions:** L'algorithme pour la recherche des chemins de propagation latéraux part du principe qu'il existe, en plus de la liaison directe entre la source et le récepteur, une liaison de chaque côté autour de l'obstacle et que les trois chemins de propagation ne se croisent pas en plan. Des chemins de propagation qui prennent par exemple la forme de lignes serpentes entre les bâtiments ou qui se situent dans les cours intérieures, ne sont dès lors pas correctement identifiés.

### 3.4 Correction pour les chemins de son par voie d'ouvertures $A_{\text{bottom}}$

Jusqu'en 2018, *sonARMS*, respectivement *sonX*, ne considéraient pas de chemins de son passant en dessous d'objets, ce qui était à l'origine de la distinction entre obstacles et écrans pare-balles. Les obstacles se caractérisaient ainsi forcément par une terminaison au sol et les écrans pare-balles étaient seulement considérés en tant que réflecteurs. Dans la nouvelle version de *sonARMS* il n'y a plus cette limitation et il est également possible de modéliser des obstacles sans terminaison au sol. Pour des raisons de rétrocompatibilité, les écrans pare-balles sont toujours à disposition. Bien que ces derniers sont définis pareil que des obstacles sans terminaison au sol, les écrans pare-balles sont seulement considérés en tant que réflecteurs dans la simulation. **Il est ainsi conseillé de ne plus utiliser ce type d'objet.**

Le calcul du chemin de son par voie d'ouverture, afin de déterminer le terme d'atténuation  $A_{\text{bottom}}$  s'effectue dans un pas supplémentaire du calcul actuel à travers et latéralement d'obstacles. Pour ceci, un deuxième calcul de son direct est effectué où tous les obstacles artificiels sans terminaison au sol qui sont présents dans la coupe originale du terrain sont omis. Dans un dernier pas, une correction pour la taille de l'ouverture est intégrée et appliquée sur le spectre d'immissions résultant. Il s'agit d'une correction pondérée de la taille de l'ouverture en proportion à la taille de la première ellipse de Fresnel à partir du point d'intersection, séparément pour chaque fréquence, en analogie avec la pondération des surfaces de réflecteur dans les réflexions du sol. Les points d'intersection d'obstacles sans terminaison au sol sont déterminés à partir de la coupe du terrain, y inclut le relief et tous les autres obstacles. Ainsi, il y aura une contribution même s'il n'existe pas de visibilité directe entre source et récepteur. La correction pour la taille de l'ouverture considère uniquement la dimension verticale. Elle fournit également une correction lorsque le trajet

acoustique déterminant traverse l'obstacle sans fermeture au sol. Dans le cas de plusieurs obstacles sans terminaison au sol, on utilise l'ouverture ayant la plus petite taille dans la verticale (ce qui correspond au plus petit facteur d'ellipsoïde de Fresnel). Les deux niveaux de son direct résultants du chemin de son à travers d'obstacles et par voie d'ouvertures sont additionnés énergétiquement. Au final, l'atténuation  $A_{bottom}$  décrit l'augmentation du niveau (exprimé en atténuation négative) du son direct en conséquence des chemins du son par-dessous d'obstacles sans terminaison au sol.

### 3.5 Correction pour la transmission acoustique $A_{trans}$

Afin de pouvoir modéliser des murs et des rideaux antibruit mobiles, la possibilité de prendre également en compte la transmission a été introduite en 2024. À cette fin, des types de matériaux supplémentaires présentant une isolation acoustique faible ou moyenne (catégorie d'isolation acoustique B1 ou B2) ont été introduits. Sur la base d'un spectre de trafic routier, une cloison de type B1 atteint une isolation acoustique DLR de 12 dB(A) et une cloison de type B2, 18 dB(A). Pour le type B3 à isolation acoustique élevée, on renonce comme auparavant à calculer un trajet acoustique à travers l'obstacle.

Le calcul de la transmission s'effectue dans une étape séparée, en complément du calcul des trajets acoustiques au-dessus, en dessous et sur les côtés des obstacles. Dans sonARMS, l'effet de la transmission est intégré dans le module BASIC de manière analogue aux trajets acoustiques sous et sur les côtés des obstacles, sous forme de correction de niveau par rapport au calcul normal du son direct, seules les augmentations de niveau étant également autorisées. Le calcul s'effectue comme suit:

1. Le trajet vertical au-dessus de tous les obstacles (artificiels et naturels) est déterminé et l'effet spectral des obstacles selon Maekawa est calculé sans limitation.
2. Les obstacles artificiels de type B1 et B2 qui apparaissent dans la coupe du terrain d'origine sont omis et l'effet d'obstacle selon Maekawa est recalculé. La différence entre les deux effets d'obstacle  $\Delta A_{bar}$  décrit l'augmentation du niveau qui résulte sans obstacles avec transmission.
3. Le long du trajet acoustique déterminé au point 2, les obstacles traversés avec transmission sont identifiés et l'atténuation de transmission le long du trajet acoustique est additionnée en cas de plusieurs obstacles avec passage du son ( $\sum DL_R$ ).
4. Le niveau sonore direct du trajet acoustique qui traverse les obstacles est calculé à partir du niveau sonore direct de référence sur tous les obstacles, y compris la réflexion au sol, auquel  $\Delta A_{bar}$  est ajouté et duquel  $\sum DL_R$  est soustrait.
5. Il est également vérifié et limité que le trajet acoustique à travers l'obstacle ne puisse pas conduire à des niveaux plus élevés qu'un trajet acoustique sans cet obstacle. Cela peut se produire en raison d'interférences destructrices au sol.
6. L'atténuation  $A_{trans}$  décrit l'augmentation du niveau sonore (exprimée en atténuation négative) du son direct qui résulte de la prise en compte du trajet sonore supplémentaire à travers les obstacles. (Le calcul s'effectue en calculant la somme énergétique du niveau sonore direct de référence et du niveau sonore direct du point 4, puis en soustrayant le niveau sonore direct de référence).

Lors du traitement des résultats, seule la correction dominante est utilisée parmi les trois corrections pour les trajets acoustiques latéraux, les trajets sous les obstacles et les trajets à travers les obstacles, voir à ce sujet le chapitre 5.

### 3.6 Stands de tir

Les stands de tir représentent une catégorie spécifique d'obstacles artificiels. Leur définition a été largement reprise du modèle de bruit de tir *sonGun* utilisé jusqu'à présent. Alors que les bâtiments sans affectation particulière sont définis seulement par leur terrain et la hauteur de leur mur, des indications complémentaires

peuvent être récoltées pour les stands de tir. En complément aux données liées au terrain, l'emplacement et la hauteur de faîtage de même que la longueur et la hauteur des écrans latéraux peuvent être spécifiées. Pour un stand de tir, les propriétés des matériaux peuvent être définies séparément pour les écrans gauche et droit. Cette définition se distingue de celle appliquée dans *sonGun* sur deux points. Premièrement, une avancée de toit peut être considérée dans *sonGun*, alors que les structures en saillie ne peuvent pas être modélisées dans *sonARMS*. Cette simplification est valable, puisque les effets d'obstacle excèdent en général déjà la limitation fixée pour les toits d'un stand de tir dépourvus d'avancées. Ainsi, un chemin de déviation supplémentaire ne mène pas à d'autres réductions du niveau sonore. Deuxièmement, les écrans latéraux sont une extension de la définition du stand de tir par rapport à la version de *sonGun*.

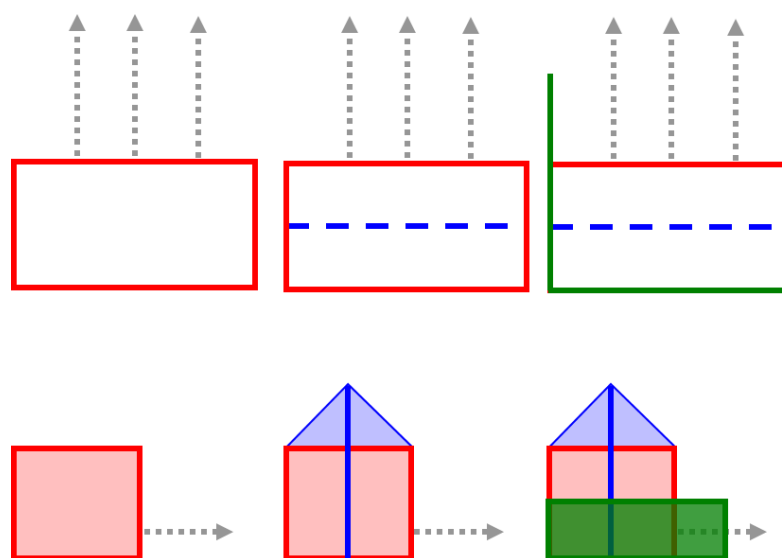


Figure 2 Schéma des objets qui seront utilisés pour définir un stand de tir, en haut selon une vue de plan et en bas selon une coupe latérale. L'objet 1 est en rouge, l'objet 2 en bleu et les objets 3 et 4 sont représentés en vert. Un élément supplémentaire est ajouté depuis la gauche vers la droite.

Selon la figure 2, les stands de tir sont modélisés à partir de 4 objets distincts, afin ne pas ajouter une catégorie supplémentaire aux obstacles artificiels déjà définis. Selon la procédure standard de définition des bâtiments de *sonX*, l'objet 1 décrit le stand de tir comme un ensemble de sommets avec une hauteur de mur uniforme. Etant donné que de cette manière, seules des constructions à toits plats peuvent être reproduites, le faîtage sera modélisé par un obstacle supplémentaire. Les objets 3 et 4 représentent d'autres éléments muraux qui peuvent être modélisés, le cas échéant, des écrans gauches et droits. Les écrans sont placés autour du stand de tir et comprennent les murs latéraux et le mur arrière. Pour les chemins de propagation provenant obliquement de l'arrière, il est ainsi garanti que les écrans sont pris en compte lors du calcul de l'effet latéral d'obstacles. A proximité du stand de tir, la hauteur de ces objets correspond à celle des écrans. Cette limitation a été choisie pour que les écrans latéraux n'influencent pas la correction de l'effet latéral d'obstacles lorsque le lien direct entre source et récepteur augmente fortement vers l'amont.

### 3.7 Ecrans pare-balles

Il arrive que le niveau des immissions dans la zone arrière aux stands de tir soit fortement influencé par les réflexions provenant des écrans de sécurité. Pour cette raison, la possibilité existe, dans *sonARMS*, de placer des surfaces réfléchissantes qui, contrairement aux murs, n'atteignent pas obligatoirement le sol. Les pro-

priétés réfléchives de ces écrans pare-balles peuvent être spécifiées de la même manière que pour la définition d'obstacles et de bâtiments. Les écrans pare-balles sont considérés dans le modèle comme étant des réflecteurs. Pour le calcul de l'effet d'écrans, ils sont cependant ignorés.

La version 4.6.0 de sonARMS offre désormais la possibilité de modéliser des obstacles sans base. Pour les écrans hauts et autres objets sans base qui génèrent non seulement des réflexions, mais aussi un effet d'obstacle, il est recommandé de ne plus utiliser d'objets écrans hauts et de les reproduire comme des obstacles sans base.

### **3.8 Analyse de la durée d'exécution et calcul du niveau sonore maximal avec la constante de temps FAST**

Ni le modèle de bruit ferroviaire *sonRAIL* ni le modèle de bruit de tir *WL04* ne sont configurés pour présenter l'évolution du niveau sonore avec le temps. Les résultats sont donnés sous forme de niveaux acoustiques moyens  $L_{eq}$  ou comme niveaux d'exposition sonore  $L_E$ . Selon son cahier de charges, *sonARMS* doit aussi pouvoir effectuer des évaluations sur la base de l'annexe 7 OPB. La grandeur acoustique de base de l'annexe 7 est le niveau acoustique maximal pondéré A avec la constante de temps FAST. Ce  $L_{AFmax}$ , n'étant pas une grandeur proportionnelle énergétiquement, une reproduction de l'évolution du niveau sonore en fonction du temps est nécessaire à son calcul. Ainsi, le modèle de propagation de *sonX* a été étendu pour comporter une analyse temporelle.

L'instant de départ est défini par le coup de feu à  $t = 0$  s. En se basant sur l'évolution de la vitesse du projectile, le temps de parcours jusqu'à la source de détonation à la bouche ou jusqu'au point de détonation est déterminé. Le moment d'arrivée du son direct provenant des trois sources partielles peut être calculé en utilisant la vitesse du son et la distance de propagation. Le niveau de son direct pondéré A est divisé en trois sur les trois chemins selon les poids et sont additionnés en un seul signal temporel selon la durée d'exécution et le niveau. Ensuite, la reproduction du niveau sonore lissé FAST de ces trois valeurs est calculé et on en déduit le niveau maximal. Les influences de la météo sur le temps de propagation du son sont ici négligées.

Le modèle de réflexions dues aux objets artificiels (module REFLECT) ne permet pas de suivre la durée du parcours de chaque chemin de propagation. Par conséquent, le réflecteur qui a une vue à la fois sur la source et le récepteur, tout en se situant à la plus courte distance de ceux-ci, sera identifié dans une étape séparée. Si aucun récepteur ne possède ces caractéristiques, c'est-à-dire qu'aucune réflexion de 1<sup>ère</sup> ordre n'a lieu, le réflecteur sélectionné est celui situé à la plus courte distance de la source et du récepteur et présentant au moins une vue directe sur le récepteur. Dans les deux cas, on suppose que les premières réflexions importantes arrivant au point de réception proviennent de ce réflecteur. Selon le « worst-case » scenario, on estime que la totalité de l'énergie sonore réfléchie est assignée au chemin de propagation source-réflecteur-récepteur et donc au temps de parcours. Ainsi, le niveau d'immissions résultant est, en général, surestimé.

**Précisions:** En général, l'influence de façades se situant en deçà d'une distance minimale n'est pas intégrée au module de réflexion. Pour cette raison, les réflexions dues au bâtiment, dans lequel serait placé un récepteur dans une fenêtre ouverte, ne sont considérées ni pour le calcul des réflexions ni pour l'analyse de durée d'exécution.

Dans le module FOREST, l'analyse de durée d'exécution du calcul des réflexions liées à la présence de la forêt ou de falaises est effectuée pour chaque réflecteur. Les paquets d'énergie qui atteignent le récepteur sont triés en fonction de leur temps d'arrivée et regroupés en utilisant une résolution temporelle précise de 10 ms. Les éléments réflecteurs représentant un assez grand nombre d'arbres sont dispersés à travers toute la surface de la forêt. Pour pouvoir compenser le degré de dispersion comparativement brute, on utilise en outre une moyenne mobile avec une constante temporelle de 150 ms.

L'évolution temporelle du son, constituée des niveaux acoustiques moyens calculés à court terme, découle des temps d'arrivée des paquets d'énergie du son direct et des réflexions provenant d'objets artificiels. Les

évolutions temporelles du son correspondantes sont générées pour chaque combinaison source-récepteur, séparément pour chaque source partielle (DB, DP, Det) et pour la somme de ces trois sources partielles.

Des lissages FAST des graphiques de l'évolution du niveau sonore produits sont effectués, individuellement pour chaque source partielle, puis globalement afin de déterminer le niveau maximal. L'algorithme pour la détermination numérique des valeurs mobiles est présenté en annexe. En fonction de la définition des paramètres, ces quatre graphiques sont également résumés dans un fichier ASCII (voir paragraphe 5). L'intervalle du graphique peut être choisi librement. Un réglage standard de 5 secondes est cependant recommandé.

## 4 Construction et organisation de *sonARMS*

### 4.1 Structure du programme

*sonARMS* ne nécessite aucune installation. Les données ainsi que les structures décrites ci-dessous doivent seulement être sauvegardées sur un serveur local. Le programme de calcul peut être sauvegardé soit dans un dossier séparé, par exemple dans les programmes, soit avec les données du projet. Cette première variante, sur laquelle se basent les réalisations ci-dessous, est conseillée pour l'utilisation de *sonARMS* en combinaison avec l'interface utilisateur. La deuxième variante est plus avantageuse pour les commandes de calcul de systèmes d'informations graphiques avec plusieurs noyaux de calcul, auprès desquels le noyau de *sonARMS* est alors copié lors de l'exécution de chaque projet. Les calculs peuvent être effectués soit sur Windows soit sur Linux

Une copie de la documentation d'informations, ainsi que deux sous-dossiers se trouvent dans le dossier du programme *sonARMS*. L'interface utilisateur, qui est activée lors du démarrage du programme `GUIsonARMS.exe`, est enregistré dans le dossier *GUI*. Dans le même dossier se trouvent, dans le cas de la variante militaire de *sonARMS*, le module balistique composé de 4 fichiers `baldll\_empa.dll`, `empa\_2004df.dat`, `empa\_2004sf.dat` et `Metpc.txt`. Le programme `SonArmsLr.exe` qui est utilisé pour le calcul des niveaux sonores partiels, ainsi que 3 fichiers textes permettant de gérer le numéro de version, les favoris et les chemins d'enregistrement, se trouvent également dans le dossier *GUI*.

Dans un deuxième dossier *Kernel*, on retrouve deux autres sous-dossiers, nommés *bin* et *settings*. Le dossier *bin* est constitué du noyau de calcul `SonArms_Kernel_V5.0.0.exe`, des quatre fichiers du module balistique ainsi que d'un fichier texte nommé `PathsSonArms.txt`. Les données `PathsSonArms.txt` définissent les chemins d'accès et de sortie de *sonARMS*. Les chemins d'accès aux données de base mentionnées y sont fixés, ainsi que les lieux d'écriture des résultats et du journal des historiques. Tous les chemins énumérés sous la rubrique «chemins de résultats et fichiers paramètres» se rapportent à l'annuaire du projet *sonARMS* (voir la section 4.3). Tous les autres chemins découlent du répertoire de programme de *sonARMS*. En fonction de la structure des données, il peut éventuellement être nécessaire d'ajuster ces chemins.

L'ensemble des données de base nécessaires au calcul est regroupé sous *Settings*. Les données spécifiques regroupées dans quatre sous-dossiers sont décrites dans le chapitre suivant.

**Remarque:** La version civile est livrée sans le module balistique et sans armes militaires.

### 4.2 Données de base

- Dans le dossier *Frequencies* se trouvent les fichiers .txt, dans lesquels la gamme de fréquences peut être réglée séparément (de 25 Hz à 10 kHz par tiers d'octave) pour le calcul de la dispersion des quatre modules de calcul. Les autres paramètres du modèle liés à la fréquence y sont également stockés et comprennent le spectre standardisé de l'effet lié aux sols pour les réflexions liées à la forêt et aux falaises (rochers), ainsi qu'un gradient de diffusion pour les réflexions liées aux falaises en fonction de la discrétisation des réflecteurs.
- Le dossier intitulé *Materials* définit d'une part, une caractérisation des différents types de sols existants et d'autre part, une classification selon les propriétés prédéterminées des matériaux pour la

description d'objets artificiels, comme les immeubles ou les murs de protection anti-bruit.

- Les matériaux sont définis selon trois propriétés : leur structure, leur capacité d'isolation et leur absorption. Les classes A1 à A4 selon EN 1793-1 sont utilisées pour l'absorption, tandis que les classes B1 à B3 selon EN 1793-2 sont utilisées pour l'isolation acoustique. Une subdivision spécifique en trois classes a été rajoutée pour les structures superficielles : C1 pour les surfaces lisses, C2 pour les surfaces peu structurées et C3 pour les surfaces fortement structurées. Pour chaque propriété du matériel, un fichier spécifique est défini. Des combinaisons spécifiques de ces trois propriétés sont listées dans un quatrième fichier nommé *Oberflächentypen.txt*. Étant donné que, pour *sonARMS*, seules les caractéristiques d'absorption sont décisives, seul ce dernier paramètre varie. Les caractéristiques liées à l'absorption sont automatiquement considérées dans le module REFLECT. La profondeur des structures peut également être prise en compte dans le module, cependant pas de façon individuelle pour chaque réflecteur, mais seulement de façon globale via la fixation d'une fréquence limite pour les réflexions spéculaires ou diffuses. Étant donné que *sonARMS* ne considère pas la propagation du son dans l'air, il n'est pas nécessaire d'introduire la capacité d'isolation comme paramètre du modèle.
- Dans le fichier caractérisant les types de terrain, des caractéristiques météorologiques et acoustiques sont définies pour 8 types de surfaces de référence. On différencie par exemple entre des eaux, des prairies ou des forêts. Des types d'utilisation du sol des fournisseurs de données, comme par exemple les 27 types de surfaces primaires selon le modèle Vector25 de swisstopo, ou les 26 classes d'occupation du sol selon la classification de la mensuration officielle sont attribués à ces types de référence. Les différents types de surfaces, classés selon leurs différentes propriétés associées, sont utilisés dans le calcul du son direct et des effets météorologiques. Les surfaces de forêt et des falaises définies à ce niveau forment également les bases de calcul pour déterminer les réflexions liées à ces éléments.
- Le dossier *Meteoprofiles* contient 15 fichiers qui comprennent les profils verticaux de vent, température et humidité. La classification des profils différencie trois classes de stabilité atmosphérique, ainsi que cinq catégories de vitesse du vent. Les profils sont enregistrés séparément pour chaque type de surface de référence et permettent ainsi d'avoir, lors du calcul, des profils très différents en fonction de la nature des surfaces (eau, bois ou champs). Pour plus de détails, veuillez-vous référer à la publication 'Application of statistical weather data from the numerical weather prediction model COSMO-2 for noise mapping purposes' dans la revue *Acta Acustica United with Acustica* (2011, Vol. 97)
- Dans le dossier *Weapons*, une ou plusieurs bases de données d'armes sont stockées sous forme de fichiers .txt (voir section 3). La version actuelle contenant des armes à usage civil est désignée sous *WeaponDatabase2018\_DeFrIt.txt*.

**Remarque:** Les données se trouvant dans le dossier *Settings* ne doivent pas être modifiées par l'utilisateur. Il convient de noter qu'une fausse manipulation des données peuvent mener à des résultats absurdes ou à une interruption/ plantage de calculs.

### 4.3 Structure et définition du projet

Pour chaque calcul effectué, une structure génère un dossier dans lequel se trouvent un fichier de projet avec l'extension WLP, ainsi que quatre sous-dossiers *Input*, *Output*, *Logfiles* et *Paramètres*. Les noms des dossiers *Output* et *Logfiles* sont définis dans le fichier *PathsSonArms.txt*. S'ils n'existent pas lors du démarrage du calcul, ils sont alors générés par le noyau de calcul. Les paramètres des données *sonARMS* se trouvent dans le dossier *Paramètres* dans lequel les configurations du noyau de calcul sont spécifiées. Le chemin d'accès à ce fichier est également défini dans *PathsSonArms.txt*.

Le fichier de projet est, comme tous les autres fichiers utilisés, un fichier texte organisé en plusieurs blocs de texte ayant un format déterminé. Il contient une référence aux données supplémentaires requises ainsi qu'aux informations spécifiques du projet, y compris l'emplacement et les caractéristiques des récepteurs, des

sources, des stands de tir, des écrans pare-balles, des obstacles, des cartes de bruit et des situations météorologiques.

Pour chaque élément présent dans le fichier .wlp, une ligne facultative est à disposition sous le champ # "" remarques "" pour les commentaires. Ces lignes sont ignorées par tous les noyaux de calculs, quelle que soit la version utilisée. En revanche, l'interface graphique GUI affiche et enregistre ces lignes de commentaires.

**Remarque:** Le noyau de calcul recherche dans le fichier de projet des mots clé allemands qui ne sont dès lors pas traduits en français.

```

*****Globale_Daten
""Topo""                Input\DTM_05m.txt""
#""Topo2""              ""
#""Topo3""              ""
""Kartenbild""          Input\PK25.tif""
#""Bild2""              ""
#""Bild3""              ""
""Primärflächen""        Input\Primaerflaeche.txt""
""Gebaeude""            Input\Gebaeude.txt""
#""Bemerkung""          ""

```

Tableau 1 Bloc de départ du fichier de projet avec liens vers les fichiers supplémentaires requis.

Le tableau 1 présente des références vers d'autres fichiers, regroupés en blocs nommés 'données globales' en début de chaque fichier de projet. La topographie est définie sous *Topo* et est définie en tant que fichier ASCII dans le ESRI-Grid format.

Dans la ligne *Kartenbild*, un fichier Bitmap ou GeoTiff peut être indiqué pour présenter une image de la carte correspondant à la section à laquelle la topographie a été préparée. Cette image n'est nécessaire qu'à l'affichage dans l'interface utilisateur, mais pas réellement au noyau de calcul. Dans le cas de fichiers bitmap, la section de l'image doit correspondre exactement à la section du fichier terrain, sinon les objets ne seront pas affichés correctement. Pour les données GeoTiff, les informations concernant l'emplacement de l'image sont incluses dans l'entête de fichier et c'est pour ceci que ce format est conseillé. Afin de faciliter une présentation de l'ensemble du domaine de projet, l'image GeoTiff doit englober une plus grande section que celle du fichier terrain.

Les données concernant l'utilisation du sol définie selon les spécifications des surfaces, elles-mêmes présentées sous forme de polygones ou sous forme de grille, sont référencées sous *surfaces primaires*. Pour les surfaces auxquelles aucun type desurface primaire ne peut être attribuée, le type de référence Prairie est utilisé.

Le fichier *Gebaeude.txt* contient les données des bâtiments représentés comme des polygones fermés. Les bâtiments sont considérés par le noyau de calcul comme des obstacles qui peuvent être saisis dans le fichier de projet, c'est-à-dire qu'ils conduisent à des effets écrans et à des réflexions. Les bâtiments provenant du fichier bâtiment, ainsi que les obstacles définis dans le fichier projet sont pris en compte pour les calculs. Il serait en principe possible de générer tous les bâtiments à partir du fichier de projet. Cependant, le concept de la définition de projet dans *sonARMS* repose sur le fait que seules les informations créées par l'utilisateur sont stockées dans le fichier de projet. Cela présente l'avantage que les fichiers de projet ne deviennent pas trop lourds et que chaque fichier résultat puisse y être ajouté (ceci pour des raisons d'assurance qualité). Comme pour les terrains ou l'utilisation des terres, la position et la hauteur des bâtiments sont des données d'entrée qui ne sont pas spécifiques au projet, mais généralement fournies par un fournisseur de données

externes (par exemple swisstopo). Les murs anti-bruit, les cloisons dans les installations de tir à courte distance, les autres obstacles en lien direct avec l'installation de tir, ainsi que la situation locale doivent être cependant saisis et contrôlés par l'utilisateur. Comme le montre le tableau 1, l'emplacement de stockage est défini en plus du nom du fichier.

Le cas échéant, des fichiers d'importation supplémentaires pour le terrain ou les images d'arrière-plan peuvent être définis avec #Topo2 et #Topo3 ou #image2 et #image3. Ces éléments constituent des alternatives supplémentaires disponibles pour l'utilisateur. Il faut cependant souligner que cette option est seulement pertinente lorsque l'interface d'importation est utilisée.

Dans les tableaux 2 et 8 ci-dessous, des exemples complets de projet de blocs introduits dans le fichier WLP sont présentés. Chaque champ de données s'explique par lui-même, ce qui permet d'éviter une description plus complète. Les informations complémentaires sont placées si nécessaire dans la légende.

#### \*\*\*\*\*Empfangspunkt

"N" 2

#### \*\*\*Empfangspunkt

"Name" M45"

"Gebäude" Haus\_1234

"Koor" 756929 1909214

#### \*\*\*Empfangspunkt

"Name" M90"

"Gebäude"

"Koor" 756900 1908504

**Tableau 2** Définition de deux points récepteurs. S'il existe une entrée sous « bâtiment », il est ainsi considéré que le récepteur se trouve au niveau de la fenêtre ouverte, sinon il s'agirait d'un point en champ libre (cette distinction a des implications pour les résultats, voir l'explication du tableau 9 le cas échéant). Les points situés dans des fenêtres ouvertes doivent être placés de 10 à 20 cm en avant de la façade du bâtiment. Aucune modification des coordonnées ne peut être faite via le noyau de calcul.

#### \*\*\*\*\*Quelle

"N" 3

#### \*\*\*Quelle

"Name" 342-Mw8.1cm(Ldg2)"

"Koor" 756895 191170 1.2

"Ziel" 756250 191930 0.6

"Waffe" Mw33/72\_8.1cmEUG91(Ldg2)"

#### \*\*\*Quelle

"Name" 300m-Stand(Stadt)"

"Koor"	757342	191292	2.5
"Ziel"	757128	191490	1.5
"Waffe"	Stgw90(5.6mmGwPat90)"		
""Quelle			
"Name"	411-EUHG85"		
"Koor"	NaN	NaN	NaN
"Ziel"	756313	191266	0.4
"Waffe"	EUHG85"		

Tableau 3 Définition de trois sources. L'identifiant sous « armes » doit se trouver dans la base de données, sinon aucun calcul n'est possible.

#### """"Schützenhaus

"N" 1

#### ""Schützenhaus

"Name"	300m-Stand"		
"BaseL"	757320	191266	6
"BaseR"	757367	191319	
"Tiefe"	10		
"FirstX"	5		
"FirstH"	9		
"BlendeLX"	15		
"BlendeLH"	2.5		
"BlendeRX"	NaN		
"BlendeRH"	NaN		
"OberflTypHaus"	502"		
"OberflTypBlendeL"	504"		
"OberflTypBlendeR"	504"		

Tableau 4 Définition d'un stand de tir. La ligne du stand de tir est définie avec baseL et baseR. Le champ profondeur désigne la profondeur du bâtiment tandis que FirstX et FirstH désignent la hauteur de la maison ainsi que l'emplacement du fronton par rapport à la ligne du stand de tir. Les autres champs à disposition permettent d'intégrer directement des écrans latéraux au stand de tir. Il faut s'assurer que les coordonnées des sources du stand de tir soient quelques centimètres en dehors du stand de tir. Dans l'interface utilisateur, il y a la possibilité d'orienter les sources par rapport à la ligne de stand de tir. Avec les trois dernières lignes, les propriétés des matériaux du stand de tir, ainsi que celles des deux écrans latéraux peuvent être définies. Le numéro d'identification utilisé se réfère à la définition du type de surface.

#### """"Hochblende

"N" 1

""Hochblende				
"Name"	300m-			
	Stand"			
"Oberfltyp"	504"			
"Koor"	2			
	757327	191273	8	5
	757360	191313	8	5

**Tableau 5** Définition d'un écran pare-balles. Les écrans pare-balles sont définis par une hauteur de début et de fin. Le « Oberfltyp » spécifie les propriétés réfléchives de l'écran pare-balles. Ces derniers sont modélisés comme des réflecteurs, mais pas comme des écrans. Il est conseillé de ne plus utiliser ce type d'objet, voir section 3.7. (Attention: Pour des raisons de consistance avec la définition d'obstacle, les indication de hauteur ont été changées dans l'ordre comparé à des versions plus anciennes.

""""Hindernis				
"N"	2			
""Hindernis				
"Name"	Alte Kaserne - Baracke"			
"Oberfltyp"	501"			
"Koor"	5			
	757184.7	190734.7	4.50	
	757162.1	190759.8	4.50	
	757155.3	190752.8	4.50	
	757177.2	190728.1	4.50	
	757184.9	190734.5	4.50	

""Hindernis				
"Name"	LSW-Alte Baracke"			
"Oberfltyp"	504"			
"Koor"	2			
	757168.8	190758.8	4	2
	757172.7	190755.1	4	2

**Tableau 6** Définition de deux obstacles. Le premier obstacle s'arrête au sol, le deuxième présente une ouverture. Le "Oberfltyp" spécifie les propriétés réfléchives des obstacles.

""""Lärmkarte				
"N"	1			

""Lärmkarte		
"Name"	Laermkarte"	
"Raster"	10	
"HüBoden"	4.2	
"Koor"	3	
	756162.1	190571.4
	756033.8	190505.3
	756026.7	190753

**Tableau 7** Définition d'une carte de bruit. La largeur de maille du point d'immission est consignée sous « raster » Si les premières et dernières coordonnées ne correspondent pas, les polygones sont automatiquement fermés.

*****Meteosituation	
"N"	2
***Meteosituation	
"Name"	Naechtliche Inversion"
"MeteoFile"	Settings \ SP_S0.txt"
"Windrichtung"	NaN
"Haeuf_Tag"	0
"Haeuf_Abend"	0.15
"Haeuf_Nacht"	1
"Temp_10m"	10
"RF_10m"	70
***Meteosituation	
"Name"	Föhn"
"MeteoFile"	Settings\ SP_L4.txt"
"Windrichtung"	31
"Haeuf_Tag"	1
"Haeuf_Abend"	0.85
"Haeuf_Nacht"	0
"Temp_10m"	20
"RF_10m"	40

**Tableau 8** Définition de deux situations météorologiques. Une direction du vent de 0 indique un vent provenant du nord tandis qu'une direction de 90 correspond à un vent d'est. Dans la première situation météorologique, aucune donnée concernant la direction du vent n'est nécessaire étant donné qu'il s'agit d'une situation de calme plat. L'indication de la température et de l'humidité relative sont facultatives.

#### 4.4 Procédé de calcul

Le début d'un calcul commence en général depuis l'interface utilisateur. Le démarrage du noyau de calcul peut cependant aussi se faire manuellement via un fichier BAT. Le fichier BAT comprend le lancement du

noyau de calcul et peut être consulté et modifié dans un éditeur de texte. Un lancement typique est semblable à ce qui suit :

**.\Kernel\bin\sonARMS ..\ProjektXY.wlp p bmfr**

En substance, la ligne ci-dessus lance le programme *sonARMS*, qui se trouve dans le dossier *Rechenkern\Bin*, charge le fichier de projet *ProjektXY* pour effectuer un calcul de point unique (paramètre **p**) via le module de calcul **b** pour BASIC, **m** pour METEO, **f** pour FOREST et **r** pour REFLECT. Par rapport au lieu d'enregistrement du fichier BAT, le noyau de calcul se trouve dans un sous-dossier et le fichier projet dans le même répertoire. Le paramètre **r** peut être utilisé à la place de **p**. Dans ce cas, le calcul ne se fait pas pour chaque point récepteur, mais pour un raster entier, ce qui permet ensuite la création d'une carte de bruit. Si souhaité, les paramètres **m**, **f** et **r** peuvent être ignorés de sorte que les modules METEO, REFLECT et FOREST restent inactivés.

Dans la mesure où les configurations correspondantes dans le fichier *PathsSonArms.txt* ne sont pas modifiées, le noyau écrit dans le dossier *fichier log* pendant le calcul des messages concernant le statut du processus, des avertissements et des erreurs rencontrées. Dans chaque cas, une entrée et un statut des données est produit. Si plusieurs modules sont lancés en même temps, un dossier par module est mis en place. Le nom du fichier se base sur le nom du projet (par ex. projet XY), la dénomination du module (Basis, Meteo, Forêt ou Réflexion) et le suffixe 'Log.txt' ou bien 'Status.txt'. Le statut des données est constamment actualisé et indique le pourcentage de calcul effectué et restant. Dans le fichier log, chaque étape de calcul est documentée, ensuite tous les avertissements et erreurs sont consignés. Les irrégularités qui peuvent être compensées par le noyau de calcul sont des avertissements. Pour la plupart, ces avertissements sont causés par des problèmes au niveau des données d'entrées, par exemple, quand les propriétés de surface d'un obstacle ne sont pas spécifiées (une valeur standard est alors choisie) ou quand un polygone de bâtiment n'est pas fermé (il sera donc automatiquement fermé). Même si le calcul n'est jamais interrompu dans ces cas-là, il est cependant conseillé de revoir les avertissements du fichier log et corriger les inexactitudes correspondantes. Les événements empêchant une exécution correcte du calcul sont des erreurs. Ceux-ci peuvent avoir lieu par exemple quand le module balistique indique que la cible n'est pas atteignable ou que les données nécessaires ne sont pas accessibles. Les erreurs mènent alors à l'arrêt du calcul. Lors de l'élaboration du modèle, une attention particulière a été prise afin de détecter de façon précoce ces erreurs et éviter ainsi un arrêt après plusieurs heures de calcul. Si le calcul doit être interrompu, un troisième fichier avec le suffixe 'Err.txt' est alors produit et les messages d'erreur correspondants y sont alors inscrits.

#### 4.5 Les paramètres sonARMS

Tous les paramètres du modèle ainsi que d'autres configurations pouvant influencer le fonctionnement du noyau de calcul sont résumés dans le fichier *SonArmsParameter.txt*. Il contient, en plus des paramètres généraux, des configurations spécifiques à *sonARMS*, ainsi qu'aux deux autres versions *sonRAIL* et *sonAIR*. Tous les paramètres sont munis de recommandations quant à leur configuration. Une description des différents paramètres est jointe à la documentation.

## 5 Résultats de calcul

Dans le fichier *Output*, quatre types de résultats sont conservés :

- Dans les fichiers avec le suffixe *WLR* (R pour result) les résultats de calcul de point unique sont résumés en tableaux compressés. Un tableau comprend neuf colonnes. Dans les quatre premières se trouvent une description des récepteurs, des bâtiments auxquels ils sont affectés (si disponible), des sources et des armes utilisées selon le projet défini. Les quatre autres colonnes contiennent les niveaux de bruit pondérés A d'un coup de feu  $L_{AE}$ , présentés séparément pour une détonation, une détonation à la bouche, une détonation due à un projectile et pour la somme de ces trois sources

partielles. Dans la dernière colonne, le niveau de bruit maximal pondéré A  $L_{AFmax}$  avec la constante de temps FAST y est stocké pour un seul événement spécifique.

- Les fichiers avec le suffixe *WLM* (M pour Map) contiennent les résultats du calcul raster. Deux fichiers sont chaque fois produits, l'un contenant le niveau de bruit  $L_{AE}$  et l'autre un niveau de bruit maximal  $L_{AFmax}$ . Les niveaux de bruit de tirs uniques sont classés dans un tableau rectangulaire, qui contient tout le domaine défini pour la carte de bruit. Les points raster situés en dehors de ce domaine ne sont pas comptabilisés dans le calcul et contiennent une valeur de -1000. Etant donné que ces fichiers peuvent être très lourds, les niveaux de bruit sont conservés dans une unité centibel (ex : 96.3 dB = 963 cB) afin de réduire l'espace de stockage nécessaire.
- Pour l'analyse des résultats de calcul de points spécifiques, les fichiers avec le suffixe *WLD* (D pour detail) sont utilisés. Les résultats détaillés sont donnés par tiers d'octave de 25 Hz à 5 KHz pour chaque combinaison de source et de récepteur ainsi que pour chaque source partielle. Ces fichiers contiennent d'autres résultats intermédiaires, par exemple les atténuations partielles, qui permettent de déduire les niveaux de bruit résultants d'un coup de feu. Le contenu détaillé de ces résultats est expliqué ci-dessous. Les coordonnées de la source, en plus des dénominations du récepteur, de la source et du type d'armes, peuvent être précisées en entête de lignes. Ceci est particulièrement utile dans le cas de détonations dues à un projectile puisque les coordonnées des points de détonation le long de la trajectoire de tir peuvent être identifiées pour chaque récepteur.
- Les graphiques décrivant l'évolution des niveaux de bruit dans le temps, comme reproduits dans le modèle, peuvent être enregistrés si nécessaire dans des fichiers avec le suffixe *WLT* (T pour time). Ces graphiques permettent d'analyser les apports des différentes sources partielles et leurs réflexions, ainsi que la constitution du niveau de bruit maximal  $L_{AFmax}$ . Ces graphiques sont créés pour chaque combinaison de source et de récepteur comme pour les résultats détaillés. Pour chaque événement, le temps d'arrivée au récepteur d'un paquet d'énergie spécifique ainsi que les niveaux de bruit pondérés A et moyennés à court terme sont enregistrés avec une résolution de 10 ms pour chacune des trois sources partielles ainsi que pour la somme de ces trois sources. Le niveau de bruit maximal de chaque source partielle est introduite dans les données détaillées, tandis que le niveau de bruit maximal, qui résulte de la somme des trois sources partielles, est conservé dans le résultat *WLR*. La figure 3 montre par exemple, pour le tableau 9, le graphique décrivant l'évolution du niveau de bruit avec le temps. L'algorithme permettant la définition de la valeur mobile effective est présenté en annexe 2.

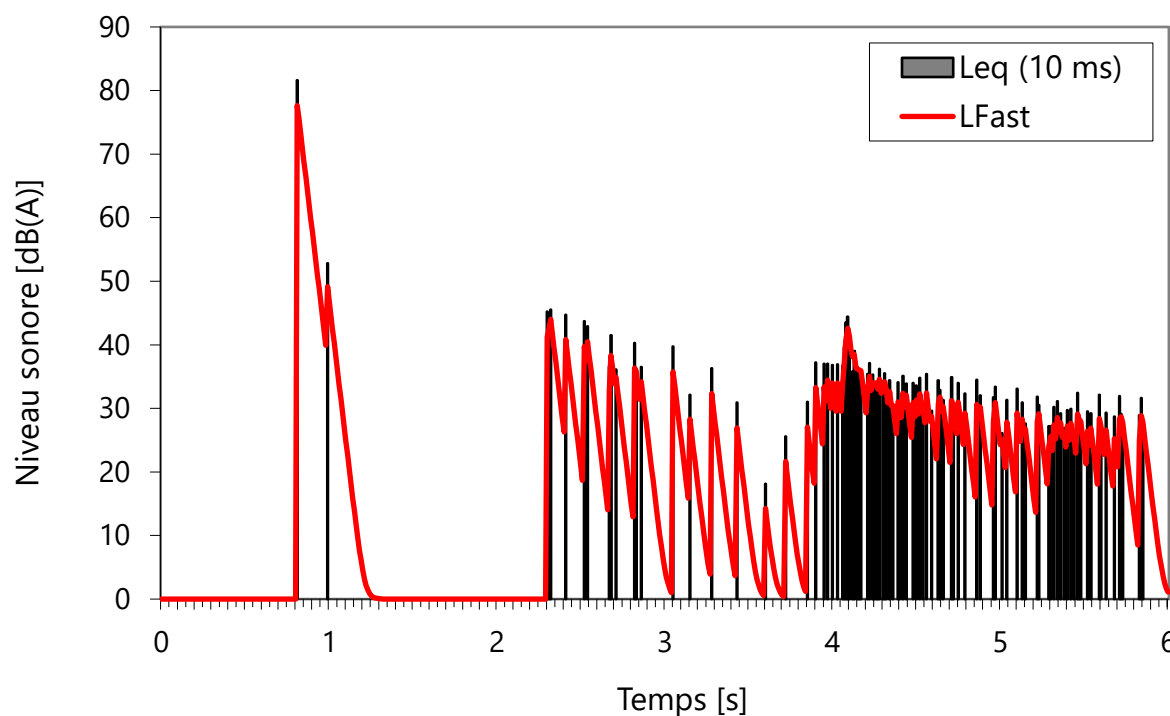


Figure 3 Evolution temporelle du niveau de bruit des évènements du tableau 9. Le son direct arrive après 0.81 s. Les réflexions provenant des bâtiments et des baraquements se concentrent à 0.99 s. Les autres apports, qui arrivent entre 2 et 6 s, proviennent eux des réflexions dues à la forêt. Le niveau de bruit maximal est déterminé uniquement par le son direct, parce que ce dernier se situe bien en dessus des différentes réflexions.

En ajustant les paramètres dans le fichier `SonArmsParameter.txt` différents résultats intermédiaires peuvent être produits et stockés également dans le dossier *Logfiles*. Ainsi, les sections de terrains ou les profils météorologiques utilisés peuvent être enregistrés. Ces fonctionnalités ont toutefois été principalement développées en vue du développement et de la validation du modèle de calcul. Elles n'ont pas été conçues pour une utilisation pratique. Puisque l'influence météorologique est définie séparément pour les différentes périodes jour, soirée et nuit, un son direct spécifique est obtenu pour chacune de ces trois périodes. Ainsi, pour tous les types de résultats, trois fichiers sont produits résumant les résultats par période avec les suffixes '\_Day', '\_Eve' et '\_Nig'.

Le tableau 9 présente à titre d'exemple les résultats détaillés du projet de démonstration, source « SH300-Links\_Stgw90 » et récepteur « E5a ». Les résultats détaillés sont examinés plus en détail, car cela permet de montrer le calcul des résultats.

	702381	SH300- Links_Stg w90	STGW90( 5.6MMG WPAT90)	Mün- dungs- knall	xyzh=	716602.9	248240.4	779.74	2.64		
E5a	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Lin	A	Max AF
Ls	101.5	111.2	118.5	124.6	130.6	129.2	125.5	122.5	139.1	137.8	146.8
Dc	5.2	4	4.3	5	5.4	3.6	3.2	3.3			
Adiv	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1	58.1			
Aatm	0	0	0.1	0.2	0.4	0.8	2.2	7.8			
AgrBar	4	8.8	11.2	14.2	14.9	15	17.7	20.8			

Afol	0	0	0	0	0	0	0	0			
Alateral	-3.5	-3.8	-4.4	-5.2	-6.4	-7.6	-8.8	-9.8			
Abottom	0	0	0	0	0	0	0	0			
Atrans	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ameteo	0	0	0	0	2.5	0	0	0.1			
Abuild	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ldir	48.1	52.1	57.8	62.3	66.6	66.5	59.5	48.9	75.9	73.9	82.8
Lfor	0	16.9	31.6	38	48.2	49.5	42.4	28.3	56.9	55.8	
Lrock	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lrefl	36.1	45.1	52.3	58.7	61	61.7	56.7	47.9	66.2	64.6	
Ltot	48.4	52.9	58.9	63.9	67.7	67.8	61.4	51.5	76.4	74.4	82.8
Elevation	0.1 °										

E5a	702381	SH300- Links_Stg w90	STGW90( 5.6MMG WPAT90)	Ge- schoss- knall	xyzh=	716441.4	248314.7	779.9	4.14		
	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Lin	A	Max AF
Ls	53.2	61.6	70.1	78.5	86.9	95.4	103.5	99.9	109.8	110.7	119.7
Dc	0	0	0	0	0	0	0	0			
Adiv	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4			
Aatm	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.8	2.9			
AgrBar	4	4	12.3	10.7	14	15.1	16.4	19.2			
Afol	0	0	0	0	0	0	0	0			
Alateral	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1			
Abottom	0	0	0	0	0	0	0	0			
Atrans	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ameteo	0	0	0	0	1.5	0	-0.1	-0.2			
Abuild	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ldir	25.4	33.6	33.6	43.5	47	55.7	62	53.6	68.1	68.8	77.7
Lfor	0	0	8	15.2	26.9	38	39	24.2	46.6	47.3	
Lrock	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lrefl	9	17.4	25.8	34.1	40.8	50.3	54.1	48.7	56.6	57.4	
Ltot	25.5	33.7	34.3	43.9	47.9	56.9	62.7	54.9	68.4	69.2	77.7

**Tableau 9** Exemple avec résultats détaillés issus du projet de démonstration (déflagration et détonation).  
Remarque : pour des raisons de présentation, seuls les niveaux de bande d'octave sont indiqués.

- La description des points de réception, les sources du son, le type d'arme selon la base de données sur les armes, les sources partielles représentées (détonation à la bouche, projectile ou détonation) est présentée au début de l'enregistrement. Dans le cas d'une détonation à la bouche, l'angle d'émission vertical est également indiqué à la fin. Les résultats intermédiaires sont résumés dans les lignes de données:  **$L_s$ : niveau d'émissions**

Pour les détonations à la bouche et les autres types de détonations, la valeur d'émission s'approche de celle d'une puissance acoustique. Dans le modèle de détonation lié à un projectile, les émissions sont enregistrées comme pression acoustique à une distance de référence de 1 m. De plus, la transformation du spectre causée

par des effets non linéaires est déjà intégrée aux niveaux des émissions dues à un projectile. Le spectre des émissions dues à un projectile est ainsi dépendant de la distance.

Pour les émissions, un niveau globale linéaire et pondéré A du bruit ainsi qu'un niveau de bruit maximal pondéré A (généralement de 9 dB(A) supérieur au niveau d'énergie acoustique) sont donnés. (Cette relation a une validité générale pour des événements semblables à des impulsions très courtes).

$D_c$  **correction de la directivité** selon l'équation 1.

Pour les détonations dues à un projectile et les détonations, le paramètre  $D_c$  vaut 0 dans chaque octave.

- $A_{div}$ : **atténuation géométrique**

Pour une détonation due à un projectile, un terme d'atténuation supplémentaire est intégré à  $A_{div}$  pour les effets non linéaires  $A_{nlin}$ .

- $A_{atm}$ : **atténuation liée à l'air**
- $A_{grBar}$ : **atténuation liée aux effets du sol et aux obstacles**
- $A_{fol}$ : **atténuation liée à la forêt**
- $A_{lateral}$ : **atténuation (négative) liée à l'effet latéral d'obstacles** (voir section 3.3)
- $A_{lateral}$ : **atténuation (négative) liée aux chemins de son par voie d'ouvertures** (voir section 3.4)
- $A_{trans}$ : **atténuation (négative) due au passage du son à travers des obstacles** (voir section 3.5).
- $A_{meteo}$ : **atténuation liée aux effets météorologiques**
- $A_{build}$ : **correction pour les récepteurs situés dans des fenêtres ouvertes**

Le paramètre  $A_{build}$  permet d'introduire une correction indépendante de la fréquence pour les récepteurs qui sont affectés à des bâtiments et donc interprétés comme des points situés dans une fenêtre ouverte (voir chap.3). Cette correction est intégrée dans le fichier des paramètres et est désactivée par défaut (voir annexe 3). Celle-ci a été introduite sur la base de la communication n° 7 concernant l'OPB de l'OFEV, datant de 1995. En effet, il peut être déduit de cette note que les points récepteurs situés au milieu d'une fenêtre ouverte présentent un niveau d'immissions d'en moyenne 1 dB(A) supplémentaire qu'en champ libre. Puisque le paramètre  $A_{build}$  est introduit comme une atténuation, cette correction peut être prise en compte lorsque  $A_{build} = -1.0$ . La correction est applicable non seulement pour un son direct, mais aussi pour des réflexions (voir équation 4). Selon de nouvelles études (voir rapport Empa Nr. 5214003130), l'augmentation du niveau sonore dans une fenêtre ouverte n'atteint que 0.5 dB(A). De ce fait, il a été décidé de s'abstenir d'introduire toute correction.

- $L_{dir}$ : **niveau de son direct** calculé selon l'équation 3.

Le calcul s'effectue par tiers d'octave, même lorsque le tableau de résultats ne comprend que des octaves pour des raisons de clarté. Les raisons de cette différence sont expliquées dans les conclusions de ce chapitre. Comme pour les émissions, le son direct est donné sous forme de niveaux globaux de bruit et de niveau de bruit d'un événement.

$$L_{dir} = \begin{cases} L_s + D_c - [A_{div} + A_{atm} + A_{grBar} + A_{fol} + \text{Min}(A_{lateral}, A_{bottom}, A_{trans}, A_{meteo})]; & A_{meteo} < 0 \\ L_s + D_c - [A_{div} + A_{atm} + A_{grBar} + A_{fol} + \text{Min}(A_{lateral}, A_{bottom}, A_{trans}) + A_{meteo}]; & A_{meteo} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

- $L_{for}$ : **Niveau d'énergie acoustique due à la forêt**
- $L_{rock}$ : **Niveau d'énergie acoustique due à des réflexions sur des parois rocheuses**
- $L_{reflect}$ : **Niveau d'énergie acoustique due à des réflexions sur des objets artificiels**

Le calcul du niveau sonore direct  $L_{dir}$ , y compris la distinction ci-dessus, est effectué séparément pour chaque situation météorologique. Pour les atténuations partielles des situations individuelles, telles que celles présentées dans le tableau 9 pour la sommation, le critère minimal selon la formule (3) est appliqué par bande

de tiers d'octave et, en conséquence,  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$ ,  $A_{trans}$  ou  $A_{meteo}$  est mis à zéro. Le niveau sonore direct  $L_{dir}$  dépend donc de la situation météorologique.

Si un calcul est effectué avec plusieurs situations météorologiques en mode METEO, les résultats détaillés sont déterminés comme suit :

1. À partir des niveaux sonores directs des situations individuelles, une moyenne énergétique de  $L_{dir}$  pondérée par la fréquence d'occurrence des situations météorologiques est déterminée.
2.  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$  et  $A_{trans}$  sont repris comme pour un calcul avec effet météorologique gênant (ou sans météo), c'est-à-dire avec le critère minimal selon la deuxième ligne de la formule (3).
3. L'atténuation  $A_{meteo}$  est ensuite ajustée de manière à ce que la somme des atténuations partielles donne le niveau sonore direct correct.

**Remarque:** Lors de la configuration du noyau de calcul, il est conseillé d'utiliser une option qui permet de tenir compte de l'effet météo évalué pour un son direct pour les niveaux d'immissions provenant du module REFLECT.

▪  **$L_{tot}$ : niveau acoustique due à un tir unique**

Le spectre se calcule comme la somme énergétique et en tiers d'octave des apports du son direct et des réflexions dues à la forêt, aux falaises et aux obstacles artificiels selon l'équation 4.  $L_{in}$  et  $A$  désignent le niveau global linéaire ou pondéré  $A$  du bruit. Pour le calcul du niveau maximal pondéré  $A$  avec la constante temporelle FAST ( $Max AF$ ), les apports du son direct et des réflexions sont également pris en compte. Pour une partie importante des réflexions, il peut y avoir des différences significativement plus petites par rapport au niveau d'énergie acoustique en comparaison au cas d'un son direct.

$$L_{tot} = [L_{dir} \oplus L_{for} \oplus L_{rock} \oplus L_{reflect}] + A_{build} \quad (4)$$

**Justification de la différenciation de cas dans le calcul d'un son direct selon l'équation 3 et la limitation des facteurs d'atténuation lors de l'addition:**

Comme pour  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$  et  $A_{trans}$ , l'effet météo  $A_{meteo}$  présente également un raffinement du calcul de son direct, qui concerne principalement l'effet d'obstacles. Alors que l'effet d'obstacle est réduit dans le cas de  $A_{lateral}$  en raison des trajets sonores latéraux, dans le cas de  $A_{bottom}$  en raison des ouvertures et dans le cas de  $A_{trans}$  en raison de la transmission, le franchissement d'obstacles dans des conditions de propagation favorables peut également entraîner une réduction de l'effet de blindage.. Il est raisonnable de considérer ces deux effets séparément puisque les gradients de température et de vent sont principalement verticaux, en négligeant les phénomènes de turbulences. Dans ce cas, il faut cependant rester attentif au fait que les immissions n'augmentent pas excessivement. Si un obstacle est franchi en raison d'effets météorologiques, l'effet ne peut être réduit avec une correction par un effet d'obstacle latéral, respectivement une terminaison au sol manquante. Si  $A_{lateral}$ , respectivement  $A_{bottom}$ ,  $A_{trans}$  et  $A_{meteo}$  présentent des valeurs négatives en tiers d'octave, alors seule la correction la plus importante en valeur absolue sera considérée. Si  $A_{meteo}$  est positif, c'est à dire que les émissions sont réduites du fait des conditions météorologiques, les deux atténuations sont additionnées.

Le même raisonnement s'applique à la combinaison  $A_{lateral}$  et  $A_{bottom}$ . De même, seule la correction la plus importante est effectuée, car il faut éviter toute surcompensation. Cela pourrait être le cas si un effet d'obstacle était réduit non seulement dans le sens vertical, mais aussi dans le sens horizontal, et qu'il en résultait finalement un niveau ou, le cas échéant, un trajet acoustique supplémentaire significatif à travers l'objet. Si toutes les composantes augmentant le niveau sonore étaient additionnées, on obtiendrait au final un niveau sonore supérieur à celui d'une situation comparable sans obstacle. Cependant il faut retenir qu'en réalité il est tout à fait possible que tous les effets mentionnés contribuent en même temps à une réduction de l'effet d'obstacle. Pour cette raison, l'approche choisie a tendance de sous-estimer l'effet réducteur du niveau.

## 6 Incertitudes du modèle

Dans le rapport de recherche de l'Empa, n° 5211.01543.100-2 datant de 2019, de nombreux calculs de comparaison avec des mesures de bruit de tir ont été compilés. Au total, 401 combinaisons de mesures de sources-récepteurs provenant de 19 places différentes ont été évaluées et comparées avec des calculs de *SonARMS*. La figure 4 montre un résumé des validations de cas. La variation moyenne entre valeur mesurée et calculée s'élève à -0.5 dB(A) l'écart-type se situe aux alentours de 4.0 dB(A). Cette comparaison décrit l'incertitude avec laquelle *sonARMS* peut reproduire une mesure spécifique dans une situation météorologique spécifique.

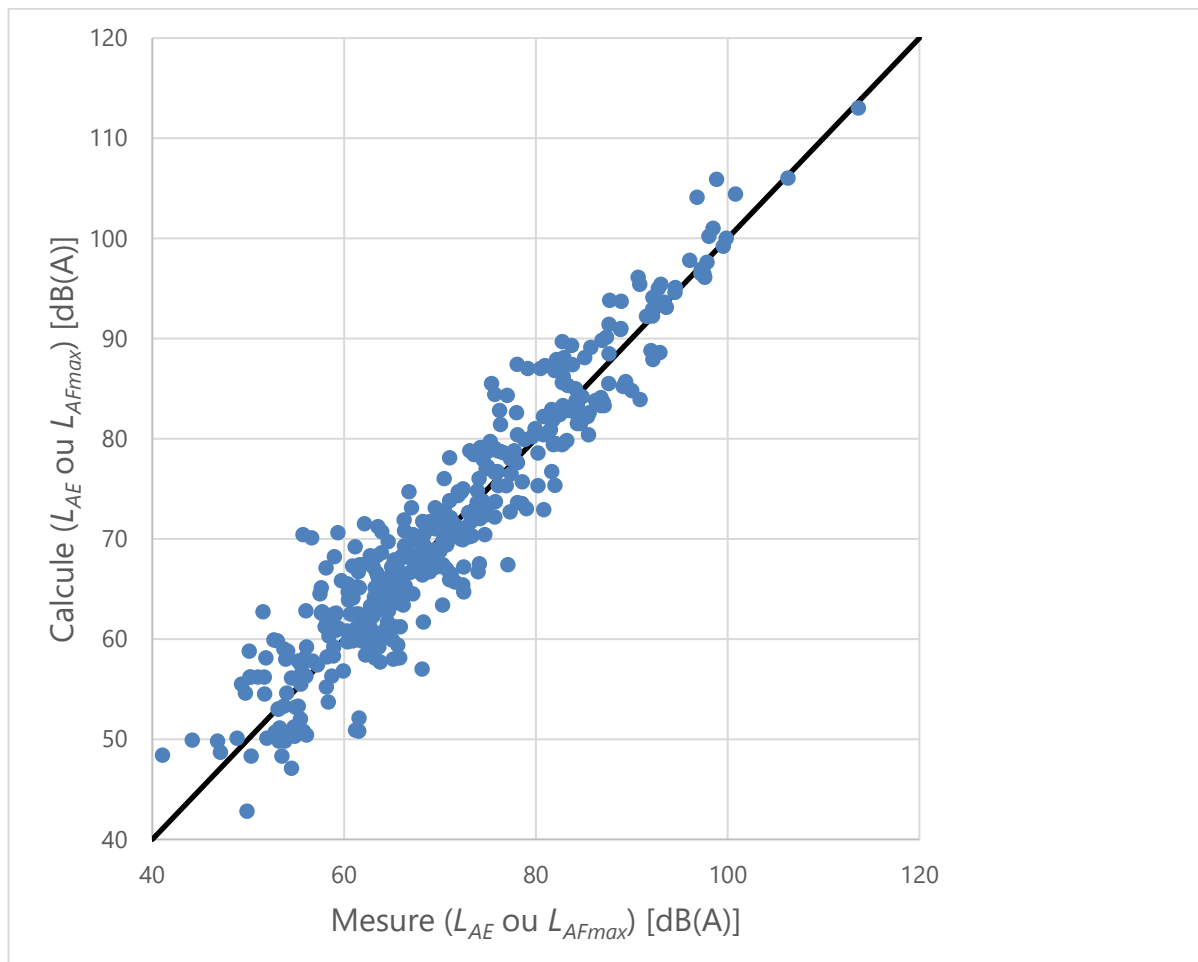


Figure 4 Comparaison entre valeur mesurée et calculée pour des multiples cas de validation.

La figure 4 montre que la dispersion augmente légèrement vers les niveaux d'événement plus bas. Il s'agit principalement de situations de propagation avec de grandes distances, des écrans importants du son direct et/ou des réflexions dominantes. Les réflexions forestières, en particulier, présentent une grande dispersion situationnelle, car les propriétés de la végétation peuvent varier considérablement d'un site à l'autre. De manière générale, on peut toutefois retenir que *sonARMS* fournit des résultats fiables sur toute la plage de niveaux et même dans des situations de propagation difficiles.

La figure 5 présente les écarts entre les mesures et les calculs sous forme de boîtes à moustaches, une évaluation séparée ayant été effectuée pour les deux grandeurs mesurées  $L_{AFmax}$  et  $L_{AE}$  en plus de l'ensemble des données. Le niveau maximal a été évalué pour 214 ensembles de données et le niveau d'événement pour 187. La médiane est de -1,3 dB(A) pour le niveau maximal et de +0,3 dB(A) pour le niveau d'événement.

ment. Étant donné que  $L_{AFmax}$  ou LAE a été enregistré dans les différentes situations, une comparaison directe n'est pas possible. Néanmoins, on peut supposer une tendance à la surestimation dans les calculs pour le niveau maximal. Sur l'ensemble des données, la médiane est de -0,5 dB(A) selon la figure 5, les quartiles 25 et 75 % étant respectivement de +2,1 dB(A) et -3,0 dB(A). 50 % des données se situent donc dans une fourchette de 5 dB(A).

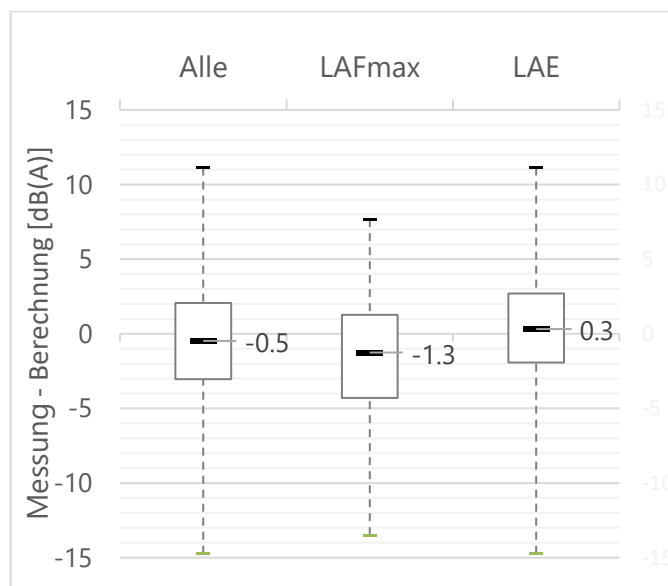


Figure 5 Influence de la taille acoustique sur l'écart entre la mesure et le calcul.

### 6.1 Estimation d'une valeur moyenne liée à l'incertitude du modèle et de la précision des pronostics de niveaux acoustiques moyens

Les standards de précision d'un modèle de calcul sont liées à la complexité des situations de propagation. Autrement dit, on peut attendre d'un modèle qu'il reproduise des situations de propagation simples avec une précision plus haute que dans des cas plus complexes, comme par exemple une grande distance de propagation, un effet d'écran ou un effet de réflexions dominantes. L'atténuation de la propagation, c'est à dire la différence entre la puissance acoustique et le niveau de bruit résultant, est utilisé comme mesure de la complexité d'une situation. Dans la figure 5, les variations entre valeur calculée et mesurée sont présentées en fonction de l'atténuation de la propagation. La valeur médiane est de 3.7%.

Sans la moyenne des erreurs stochastiques, l'incertitude varie entre 2.5 et 3.0 dB(A), alors qu'en la prenant en compte, l'imprévisibilité se réduit à environ 0.5 dB(A). L'incertitude liée à la moyenne annuelle dans des situations concrètes dépend, premièrement du nombre de sources de bruit partiel ayant un apport significatif par rapport au niveau d'évaluation résultant, et deuxièmement, de la justesse de l'hypothèse d'une erreur purement stochastique. L'incertitude qui en résulte varie dans une gamme intermédiaire de valeurs et est estimée par un écart-type de 1 – 2 dB(A).

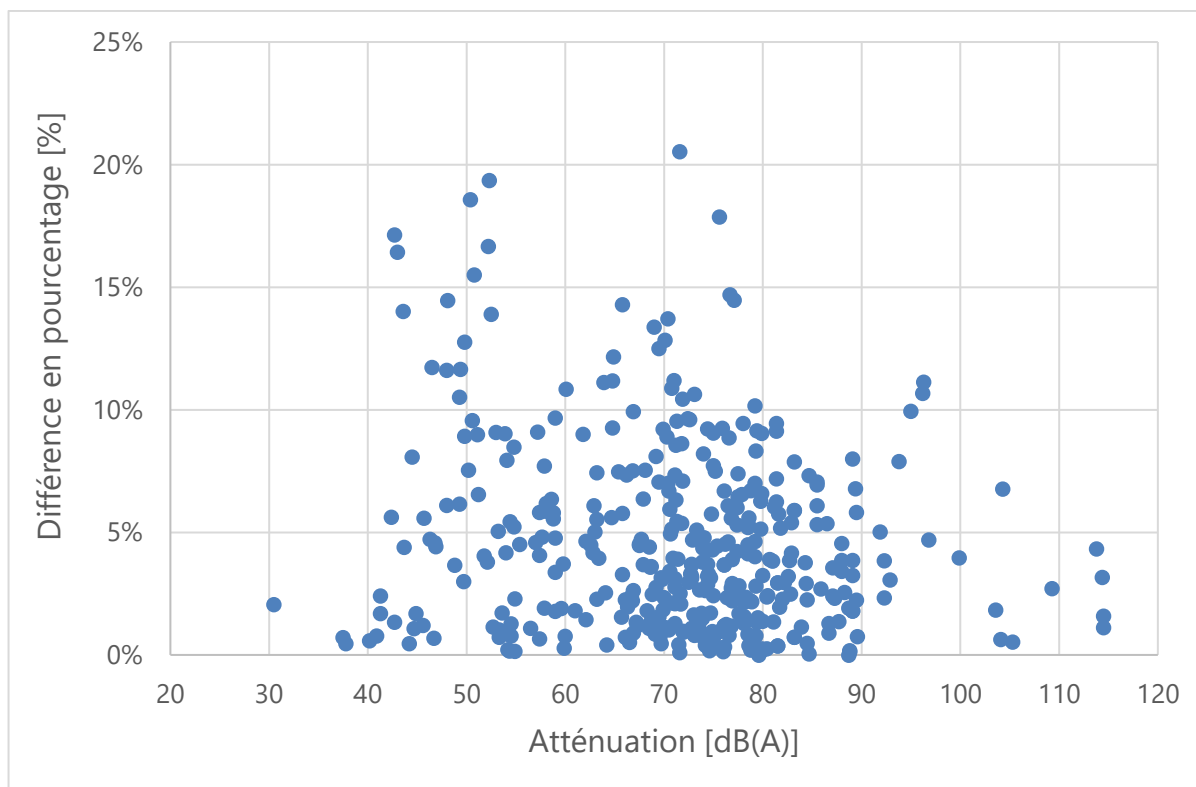


Figure 6 Résumé en pourcentage des variations pour tous les cas de validation.

## 6.2 Évaluation de la précision des prévisions des niveaux d'évaluation

Les incertitudes indiquées décrivent la capacité du modèle sonARMS à reproduire les moyennes individuelles des séries. Toutefois, pour évaluer des situations concrètes, ce ne sont pas les niveaux de tir individuels qui sont déterminants, mais les moyennes annuelles de l'ensemble des activités de tir. Dans le rapport de validation de 2013, une estimation de l'incertitude des niveaux d'évaluation déterminés avec sonARMS a donc été effectuée et un écart type de 1 à 2 dB(A) a été estimé pour les valeurs limites d'immission aux niveaux de sensibilité ES II et ES III. Compte tenu des faibles différences entre les résultats de validation de 2019, cette affirmation reste valable pour la version actuelle de sonARMS.

## 6.3 Limites de sonARMS

Lors du développement de sonARMS, on a tenté de représenter toutes les situations et mesures de protection contre le bruit pouvant se présenter dans le domaine du tir civil et militaire. Il existe toutefois des limites conceptuelles qui rendent son utilisation difficile dans certains cas ou qui limitent la fiabilité des résultats. Un aspect central est que le calcul du bruit direct repose sur des coupes verticales qui n'autorisent qu'une seule hauteur Z pour chaque point X-Y. Par conséquent, sonARMS ne permet pas de reproduire des structures en surplomb. Les installations de tir avec un encoffrement partiel ne peuvent donc pas être reproduites de manière appropriée. De même, la modélisation de plafonds modulaires ainsi que la combinaison de plusieurs mesures d'insonorisation sont très exigeantes. Dans ces cas, il est recommandé de recourir en plus à des résultats de mesures ou de se baser sur des simulations avec un modèle de théorie des ondes.

# Annexe

## Formule pour le calcul du bruit de trajectoire selon ISO 17201-4

### Calcul du spectre du bruit de trajectoire

Remarque : La multiplication de la longueur effective du projectile par un facteur 1,7 correspond à une modification du standard ISO 17201-4, introduite en 2016.

Calcul du niveau des émissions pour une distance de référence de 1 m :

$$L_{E,s,bb} = L_0 + 10 \log \left( \frac{d_p^3}{(1.7 \cdot l_p)^{3/4} \cdot r_0^{9/4}} \right) + 10 \log \left( \frac{M^{9/4}}{(M^2 - 1)^{3/4}} \right) [\text{dB}]$$

Avec :

$L_0$ : 161.9 dB

$D_p$  : Diamètre de projectile (calibre) maximal [m]

$L_p$  : Longueur effective de projectile (longueur du point jusqu'à la zone du diamètre maximal) [m]

$M$  : Chiffre Mach local du projectile au point de la source

$r_0$  : Distance de référence = 1 m

Calcul du spectre du bruit de trajectoire :

$$L_{E,s}(f_i) = L_{E,s,bb} + C_i - C_{tot}$$

Avec :

$f_i$  : Fréquences moyennes des bandes par tiers d'octaves de 12.5 Hz à 10 kHz

$C_i$  : Valeur de correction de la bande de tiers d'octave  $i$  selon équation 7

$C_{tot}$  : Somme des valeurs de correction  $C_i$  selon équation 8

$$\begin{cases} f_i < 0.65 f_c : C_i = 2.5 + 28 \log \left( \frac{f_i}{f_c} \right) \\ f_i \geq 0.65 f_c : C_i = -5.0 - 12 \log \left( \frac{f_i}{f_c} \right) \end{cases}$$

$$C_{tot} = 10 \log \sum_{i=11}^{40} 10^{\frac{C_i}{10}}$$

Avec :

$f_c$  : Fréquence de signature selon équation 9

$$f_c = f_0 \frac{(M^3 - 1)^{\frac{1}{4}} \cdot (1.7 \cdot l_p)^{1/4} \cdot r_0}{M^{3/4} \cdot d_p \cdot r^{1/4}}$$

Avec :

$r$  : Distance point de source–récepteur en mètre

$f_0$  : Fréquence de référence = 175.2 Hz (bei 10°C)

### Atténuation à la propagation spécifique

Calcul de l'atténuation géométrique  $A_{div}$  :

$$\begin{cases} r < R_{coh} : A_{div} = 10 \log \left( \frac{r^2 k + r(M^2 - 1)}{r_0^2 k + r_0(M^2 - 1)} \right) \\ r \geq R_{coh} : A_{div} = 10 \log \left( \frac{r^2 k + r(M^2 - 1)}{r_0^2 k + r_0(M^2 - 1)} \right) + 25 \log \left( \frac{r}{R_{coh}} \right) \end{cases}$$

Avec :

$k$  : Réduction locale de la vitesse du projectile par mètre, divisé par la vitesse du son  $c$ .  $k$  ne doit pas baisser plus bas que  $10^{-8}$ .

$r_0$  : Distance de référence = 1 m

$R_{coh}$  : Distance de cohérence selon équation 11

$$R_{coh} = \text{Min} \left[ \frac{(M^2 - 1)(l_t/2)^2}{M^2 c_{am}/f_c}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{\frac{3}{2} l_0 l_t^2 (M^2 - 1)}{M^2 \mu_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Avec :

$l_t$  : Longueur totale de la trajectoire, soit jusqu'au but, soit jusqu'au point à partir duquel le nombre de Mach local reste inférieur à 1.01.

$l_0$  : Longueur de référence = 1.1 m

$\mu_0^2$  : Ecart type de l'index de la réfraction du son fluctuant, écart type standard =  $10^{-5}$

$M$  : Nombre de Mach local au point de source

$c_{am}$  : Vitesse de son local [m/s]

Calcul de l'atténuation supplémentaire non linéaire  $A_{nlin}$ :

$$A_{nlin} = 5 \log \left( 1 + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{(M^2 - 1)}{r_0 k}} \ln \left[ \frac{r + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r^2 + r \left( \frac{M^2 - 1}{k} \right)}}{r_0 + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r_0^2 + r_0 \left( \frac{M^2 - 1}{k} \right)}} \right] \right)$$

### **Algorithme pour la détermination numérique de la valeur effective continue**

Le niveau maximal d'un événement correspond au maximum du niveau effectif continue

$$L(t) = 10 \log \left( \frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} e^{\frac{\tau-t}{RC}} d\tau \right) [\text{dB}]$$

Avec :

RC : Constante de temps Fast = 0.125 s

p(t) : Evolution de la pression du son dans le temps

p0 : Pression du son de référence =  $2 \times 10^{-5}$  Pa

La simulation par calcul fournis pour chaque intervalle de temps  $\Delta t$  une valeur moyenne au carré.

$$\frac{\bar{p}^2(t)}{p_0^2}$$

L'évolution de la valeur effective continue au carré  $x_{\text{eff}}^2(t)$  dans le temps peut être indiquée itérativement :

$$x_{\text{eff}}^2(t + \Delta t) \approx x_{\text{eff}}^2(t) + \frac{\frac{\bar{p}^2(t + \Delta t)}{p_0^2} - x_{\text{eff}}^2(t)}{\frac{RC}{\Delta t}}$$

En connaissant le  $x_{\text{eff}}^2(t)$ , le niveau de la valeur effective continue  $L(t + \Delta t)$  peut être défini par l'équation suivante :

$$L(t + \Delta t) = 10 \log (x_{\text{eff}}^2(t + \Delta t))$$