

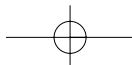
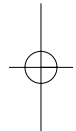
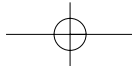


Territorial Insert of Airports

# Projet pour l'intégration environnementale des aéroports de l'Espace Méditerranée Occidentale



SYNTHÈSE TECHNIQUE



# TERIA

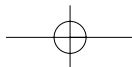
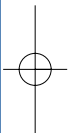
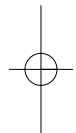
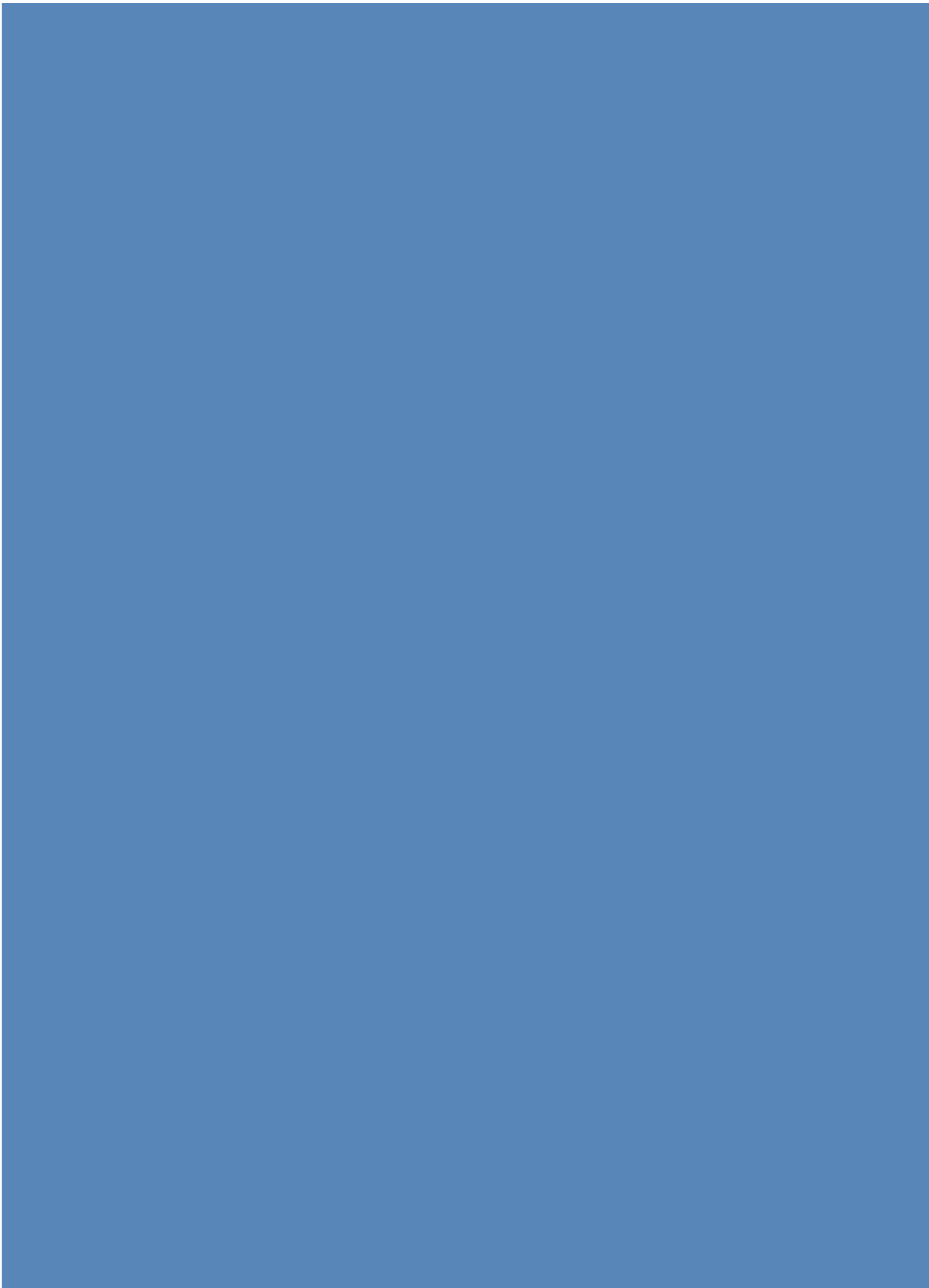
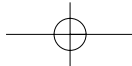
Territorial Insert of Airports

*Teria est un programme européen visant à développer des technologies innovantes pour faciliter le fonctionnement des aéroports dans leur environnement.*

*Ce rapport est une synthèse technique résumant les travaux menés par les partenaires techniques de Teria, pour expérimenter des systèmes de contrôle actif des nuisances sonores aéroportuaires.*

*L'ensemble des explications, commentaires et résultats des travaux est accessible sur le site internet de TERIA : [www.teria-itc.cnr.it](http://www.teria-itc.cnr.it)*





# sommaire

1. Les aéroports : éléments clés de la compétitivité des territoires
2. L'influence des aéroports sur l'environnement sonore
3. Le Projet TERIA
4. L'expérimentation TERIA
5. Lignes directrices pour le contrôle actif en espace clos
6. Nouvelles techniques d'évaluation du bruit aéroportuaire et aspects épidémiologiques
7. Évaluation des résultats des systèmes actifs : suggestions issues du projet

## 1. LES AÉROPORTS : ÉLÉMENTS CLÉS DE LA COMPÉTITIVITÉ DES TERRITOIRES

Dans le contexte de mondialisation que nous connaissons aujourd'hui, les aéroports constituent un élément clé de compétitivité pour les territoires sur lesquels ils sont bâtis. Mais leur implantation dans des régions européennes stratégiques ne peut se faire sans réflexion collective, car il s'agit de territoires à forte densité de population. Il est donc essentiel de veiller à une intégration environnementale adéquate de ces infrastructures afin de protéger l'environnement.

Afin d'éviter la dégradation des territoires, le développement incontrôlé, la dispersion des ressources publiques et privées, la diminution de la valeur des biens immobiliers, l'image négative des aéroports, il est nécessaire que les projets soient accompagnés par de réels politiques de développement.

En matière environnementale, les 4 grandes catégories d'effets représentant des défis à relever :

- > La qualité de l'air
- > La lutte contre le bruit
- > La gestion de la production de déchets
- > La qualité de l'eau

### Points clés

- Le trafic aérien a été multiplié par 5 depuis 1970 et il devrait doubler tous les 10 à 14 ans.
- Le Traité de Maastricht a introduit la notion de réseaux transeuropéens, encourageant par la même leur développement.
- Les fonds attribués par l'Union Européenne sont conséquents; il faut donc veiller à ce qu'ils soient utilisés à bon escient et atteignent les buts fixés.

## 2. L'INFLUENCE DES AÉROPORTS SUR L'ENVIRONNEMENT SONORE

### 2.1 Problèmes liés à la pollution sonore

Le bruit émis par l'avion a les caractéristiques suivantes : un nombre relativement limité d'événements pendant le jour ; des niveaux relativement élevés de pression acoustique ; une caractérisation du bruit différente et spécifique comparée à d'autres sources de bruit.

Bien que le bruit produit par un avion ait une durée limitée, il est très intense et dépend de facteurs multiples comme le modèle d'avion, l'altitude, la trajectoire, la phase de décollage ou d'atterrissage.

### 2.2 Les réglementations européennes pour le contrôle des nuisances sonores

Actuellement, toutes les politiques visant à réduire le bruit lié aux aéroports sont toujours basées sur les mesures de prévention et de réduction édictées par l'ICAO (Organisation Internationale d'Aviation Civile) en 1968.

Elles visent :

- > une diminution du nombre d'avions bruyants
- > des restrictions aux vols de nuit
- > une surveillance des niveaux de bruit
- > un plan d'aménagement du sol
- > des programmes d'insonorisation
- > des taxes sur le bruit
- > des procédures antibruit

Il est évident que la réduction à la source de bruit est la manière la plus efficace de diminuer la nuisance sonore. C'est la raison pour laquelle, dans un accord international, les avions ont été classés par catégorie en terme de niveaux sonores émis. Cette définition a servi de base pour toutes les normes de restrictions internationales.

De plus, avec la directive 2002/49/EC, l'Union Européenne a envisagé le besoin de tous les États membres d'élaborer des cartographies du bruit et des plans d'action pour contrôler le bruit aéroportuaire d'ici 2007-2008. La directive encourage également la coopération entre les États membres afin d'identifier les descripteurs de bruit qui peuvent mieux décrire le bruit lié aux aéroports.

### **2.3. Techniques traditionnelles de contrôle des bruits aéroportuaires ; méthodes de surveillance et réglementations administratives.**

Il y a quatre principales façons pour les aéroports de réduire les émissions de bruit :

- > la limitation des vols de nuit. Ceci a été appliqué dans de nombreux aéroports européens, avec des restrictions partielles et totales. En général, la tranche horaire concernée est de 22h00 à 06h00, puisque la gêne majeure pour les habitants a lieu pendant la nuit.
- > la surveillance du bruit occasionné par les avions. Elle s'opère en combinant les mesures de bruit détecté par les unités de contrôle spécifiquement créées, corrélées avec le radar du trafic aérien dans le secteur. Cela permet de détecter de nouvelles perturbations sonores et de réfléchir aux solutions potentielles pour dépasser ces nuisances. En outre, cette surveillance sert à analyser la superficie du territoire et à mesurer le nombre de personnes exposées à la pollution sonore engendrée par l'aéroport.
- > les restrictions au nombre de mouvements d'avion classés comme les plus bruyants
- > des différences dans les tarifs appliqués aux avions en transit.

### 3. LE PROJET TERIA

Dans le cadre de la politique régionale communautaire, l'initiative communautaire INTERREG III est l'un des quatre programmes mis en place par la Commission Européenne afin d'identifier des solutions communes à des problèmes spécifiques.

La politique communautaire vise un développement durable et harmonieux du territoire européen. Dans ce but, des partenariats entre pays membres ont été formés pour favoriser un aménagement équilibré, conduisant à la cohésion de grands espaces géographiques choisis par la Commission Européenne et les États membres.

Le Programme Interreg III B Medoc soutient les projets qui concernent la coopération pour le développement territorial des pays de la Méditerranée occidentale.

Le Projet TERIA (Territorial Insert of Airports) s'inscrit dans l'initiative communautaire INTERREG III B Meddoc. Il porte sur l'intégration environnementale des aéroports de l'espace Méditerranée Occidentale. Le but de TERIA est de proposer des solutions visant à protéger les territoires et leurs habitants du bruit d'origine aéroportuaire. Il concerne des partenaires italiens, espagnols, français et suisses.

#### **Les principaux axes de recherche du programme TERIA concernent :**

- l'expérimentation de nouvelles techniques de mesure et de surveillance des bruits aéroportuaires
- l'analyse précise de la source du bruit et de son récepteur
- une proposition commune de nouveaux indicateurs acoustiques
- l'amélioration des techniques d'isolation sonore passive des maisons
- une expérimentation de systèmes innovants basés sur le contrôle actif pour améliorer le confort des espaces ouverts ou fermés
- des essais de systèmes de contrôle mixte du bruit, actif et passif, adaptés à l'habitat.

Pour faciliter la coexistence entre le développement économique des aéroports et la qualité de vie des riverains, le projet TERIA permet d'étudier et d'expérimenter des technologies innovantes. Ces nouvelles technologies se basent sur le concept du contrôle sonore actif qui est déjà développé et fonctionne bien dans des milieux fermés, type conduit de ventilation ou cabine de conduite. L'idée novatrice est d'étendre ce concept à des espaces extérieurs ouverts, où les sources sonores sont nombreuses, fluctuantes et mobiles, et où l'environnement est sujet à des phénomènes de réflexion.

Les atouts majeurs de ce projet sont l'adaptabilité des résultats à des situations territoriales variées, ainsi que l'optimisation des ressources disponibles dans les centres de recherche européens, et la réduction des coûts grâce à l'utilisation d'un site expérimental commun à tous les partenaires.

### Les partenaires institutionnels

**La Région LOMBARDIE** est le chef de file du projet TERIA avec l'assistance technique de Finlombarda spa. Elle est responsable de la coordination générale du projet ainsi que de la réalisation de la gestion budgétaire et financière. Elle représente aussi tous les partenaires auprès des autorités et de la Commission Européenne. La région Lombardie a également pour mission de superviser le site expérimental de Milan-Malpensa, et de participer à la diffusion des résultats du projet.

**La Province de VARESE** en Lombardie, en qualité de collectivité territoriale représentante des administrations locales participe à la diffusion des résultats au niveau local et collecte les observations qui pourront être utiles au prolongement ultérieur du projet.

**La Province de NOVARE** en Piémont, en collaboration avec l'agence régionale de l'environnement du Piémont (ARPA Piemonte) et la société gestionnaire des aéroports milanais (SEA), contrôle les niveaux sonores sur le territoire concerné par le survol des aéronefs. Elle est également chargée de la diffusion des résultats et du recueil d'observations.

**Le Gouvernement des ÎLES BALÉARES** en Espagne a pour principale mission la réalisation, la diffusion et le traitement d'une enquête relative à la perception subjective des riverains de l'aéroport de Palma de MAJORQUE vis-à-vis des nuisances sonores. Cet aéroport est site expérimental du projet.

**La Chambre de Commerce et d'Industrie de Lyon** représente les acteurs de la région Rhône-Alpes dans ce projet. Elle assure la gestion de l'aéroport de Saint-Exupéry, retenu comme site expérimental du projet. La CCI de Lyon est chargée d'actions de communication, de l'organisation de réunions techniques avec des acousticiens français, et de la dissémination des résultats du projet auprès des riverains de l'aéroport et des organismes publics.

## Les partenaires scientifiques

**L'Institut pour les Technologies de la Construction du Centre National de la Recherche** en Italie s'est vu confier la coordination de l'équipe des partenaires scientifiques, la conception de sa propre fenêtre active, son installation et son expérimentation sur le site expérimental de Milan-Malpensa. L'ITC a pris en charge l'aménagement et la gestion du site expérimental commun de Milan-Malpensa ainsi que la réalisation du châssis de la barrière virtuelle. Il collabore avec les autres partenaires scientifiques à la définition d'une méthodologie commune d'évaluation des systèmes actifs.

**Le Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS de Marseille** est en charge de la réalisation des composants et de l'électronique de la barrière virtuelle active, et de son expérimentation sur le site de Milan-Malpensa. Il doit aussi contribuer à la définition d'une méthodologie commune d'évaluation des systèmes actifs.

**L'Institut Polytechnique de Milan** travaille sur le développement des algorithmes adaptés aux exigences de la fenêtre active de l'ITC, l'étude et la réalisation d'un système de contrôle du bruit sur le site de Milan-Malpensa, et participe également à la définition de la méthodologie commune de mesure des nuisances aéroportuaires.

**Le Laboratoire d'Ingénierie Acoustique et Mécanique de l'Université Polytechnique de Catalogne** en Espagne a réalisé sa propre fenêtre active, et l'a expérimentée sur l'aéroport de Palma de Majorque, puis sur le site de Milan-Malpensa. De plus, il a réalisé une étude des paramètres descriptifs de la pollution sonore provoquée par les aéroports. Enfin, comme les autres partenaires scientifiques, il travaille sur la méthodologie de mesure commune.

**Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble** a assuré l'étude et la réalisation d'une fenêtre anti-bruit hybride combinant une isolation passive et des ouvertures de ventilation actives. Le système a été installé puis expérimenté sur les sites aéroportuaires de Lyon Saint Exupéry et de Milan-Malpensa. Le CSTB travaille également sur l'élaboration de la méthodologie de mesure commune.

**L'École Polytechnique Fédérale de Lausanne** s'est vue confier l'étude d'antennes intelligentes pour la discrimination d'un bruiteur et de ses premières réflexions. Elle a apporté ses conseils en électroacoustique et contribue à la planification et à la caractérisation des systèmes actifs.

## 4. L'EXPÉRIMENTATION TERIA

### 4.1. Systèmes innovants de réduction du bruit

Il y a deux manières complémentaires d'intervention afin de réduire le bruit dû aux aéroports : la limitation d'émission de la source (avions en vol ou sur terre, les opérations fonctionnelles de l'aéroport) et/ou l'augmentation de l'isolation du récepteur.

Afin de répondre à cette dernière exigence il est possible :

- > de faire appel à des méthodes traditionnelles, améliorant la qualité acoustique des matériaux de construction et des composants des espaces à vivre où se trouvent les récepteurs , ou interposer des boucliers physiques entre la source et l'environnement interne ou externe à protéger ;
- > d'appliquer des systèmes innovants pour réduire le bruit.

Parfois le genre particulier de bruit émis et/ou les conditions du confort de vie excluent la possibilité d'employer uniquement des méthodes traditionnelles (connues sous le nom de "méthodes passives") et conduisent à appliquer des méthodes innovatrices comme le système de contrôle actif du bruit ; c'est justement le cas des bruits aéroportuaires.

#### Qu'est-ce que le contrôle actif du bruit (ANC) ?

Le principe fondamental du contrôle actif du bruit est d'annuler les ondes frontales émises par une source extérieure primaire (la source gênante) en superposant des ondes frontales "miroirs", c'est-à-dire une onde de son avec des composants de même amplitude et de fréquence, mais en opposition de phase, émise par une source secondaire convenablement dirigée. En d'autres termes, le contrôle actif du bruit est basé sur l'interférence destructrice.

Le contrôle est dit *Actif* car il nécessite de produire du bruit pour réduire le bruit !

Une centrale numérique se charge d'acquérir les signaux capturés par des microphones, de les traiter en temps réel et de définir le signal à envoyer aux haut-parleurs. Afin de moduler le signal de contrôle, cette centrale se réfère à des algorithmes pouvant "s'adapter" aux variations du bruit gênant et aux conditions climatiques ou au vieillissement des matériaux impliqués.

En d'autres termes, l'unité de traitement met en application un filtre numérique adaptatif, où le mot "adaptatif" signifie que les paramètres du filtre peuvent être changés selon un critère d'optimisation, basé sur les signaux acquis par les microphones d'erreurs. Le critère le plus largement répandu d'optimisation est le critère Least Mean Square (LMS).

Le contrôle Actif du bruit est principalement utilisé en espace clos (gaine de ventilation, habitacle de véhicules, etc.) et peu d'expérimentations ont été faites sur les *Barrières Actives*, en particulier au voisinage d'aéroports. On peut cependant citer les études réalisées à l'aéroport de St Exupéry par Le Comptoir de la Technologie, inventeur du concept d'*Écrans Actif*, ou celles de WYLE LABS, aux États-Unis, pour les avions au point fixe sur une piste.

L'étude des Barrières Actives menée dans TERIA constituait donc un projet pilote qui en est encore à un stade de recherche.

#### 4.1.1. Protection des espaces ouverts : la barrière active

*Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) du CNRS de Marseille*

Une *Barrière Active* est une antenne de haut-parleurs dirigée dans la direction d'où provient un bruit indésirable (les avions décollant de l'aéroport de Malpensa dans le cas du projet TERIA).

Un système électronique appelé contrôleur calcule le signal à envoyer à chaque instant aux haut-parleurs de façon à produire derrière l'antenne une sorte "d'ombre acoustique".

Comme indiqué précédemment, le principe d'une barrière active est de réduire, derrière l'antenne, le bruit de l'onde plane incidente de l'avion en générant une onde plane opposée. La difficulté principale d'une telle application du contrôle actif provient du déplacement de la source de bruit à traiter et de sa bande de fréquence. Il est en effet beaucoup plus facile de traiter par contrôle actif un bruit périodique fixe comme celui d'un moteur thermique par exemple, que celui plus complexe d'un avion au décollage.



*La barrière Active sur le site expérimental de Malpensa.*

Une particularité de la *Barrière Active* de Malpensa résulte de la simplicité de l'algorithme utilisé pour piloter les haut-parleurs. Le contrôle de chaque source est indépendant les uns des autres (le contrôle est dit décentralisé ou diagonal). Certaines considérations géométriques doivent être respectées pour avoir un tel contrôle mais le principal avantage qui en découle est une simplification de l'électronique et de la mise en œuvre.

Les résultats d'atténuation prévus par simulation de la barrière active de TERIA étaient d'environ 5 à 10 dB pour une bande de fréquence de 80 à 400 Hz dans une zone de l'ordre de 5x5x10 mètre derrière l'antenne dans le cas d'une source de bruit fixe, et un peu moins dans le cas du bruit émis par les avions au décollage. Les premières expériences réalisées sur le site ont confirmé ces chiffres.

Ces résultats modestes rappellent que les *Barrières Actives* ne sont pas une solution miracle pour réduire les nuisances sonores d'un aéroport. Elles peuvent s'avérer néanmoins utiles dans certains cas. On pourrait par exemple les utiliser pour protéger la façade d'un bâtiment administratif ou bien la cours de récréation d'une école voisine de la piste de décollage.

C'est la première fois qu'une barrière active avec un tel nombre de modules est expérimentée en situation réelle sur un véritable bruit d'aéroport.

Les conditions expérimentales exceptionnelles du site de Malpensa ont déjà permis d'obtenir des résultats intéressants. Ces résultats, en accord avec les simulations ne donnent pas, d'un point de vue subjectif, des atténuations impressionnantes.

Des améliorations sont actuellement à l'étude pour augmenter ces performances et devraient être rapidement appliquées au système de contrôle.

### Principe de la barrière active

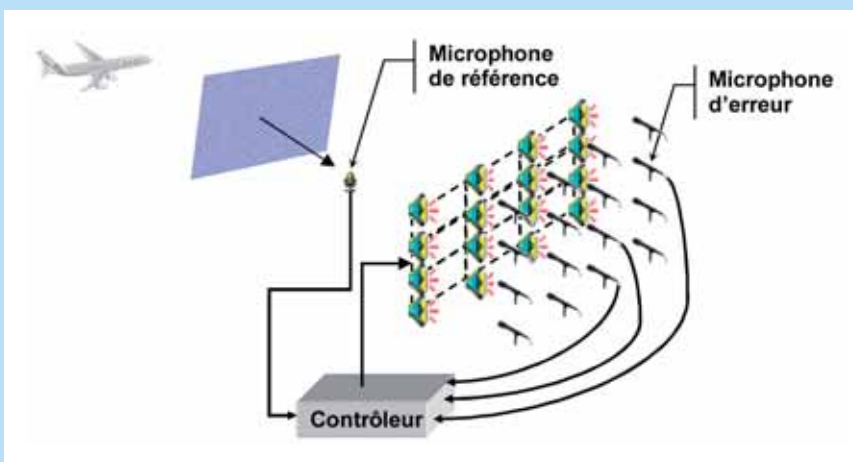
Une *Barrière Active* est composée de 3 éléments principaux :

- > Un microphone de référence
- > Une antenne de N modules (haut-parleurs + microphone d'erreur associé).
- > Un système électronique de pilotage appelé *contrôleur*

Le microphone de référence positionné 3 ou 4 mètres devant l'antenne détecte l'onde incidente produite par l'avion. Le signal de ce microphone est filtré de manière adaptative par le contrôleur qui génère les N signaux de commande des haut-parleurs de manière à produire une annulation du champ acoustique sur les N microphones d'erreur placés derrière chaque source. La réduction du bruit sur ces microphones se traduit par une réduction dans une zone étendue derrière l'antenne, zone dont la dimension dépend de la fréquence et de l'espacement des modules.

Les différents algorithmes chargés dans le contrôleur peuvent produire deux types de contrôle :

- 1°) Un contrôle dit *global*, où le calcul de la commande optimale d'un haut-parleur dépend de tous les signaux des microphones d'erreur. En raison de l'importante puissance de calcul temps réel que nécessite ce type de contrôle, on le limite en général à des antennes à faible nombre de modules (<10).
- 2°) Un contrôle dit *diagonal*, où le calcul de la commande optimale d'un haut-parleur dépend uniquement du signal du microphone d'erreur associé. Il n'y a a priori aucune limite au nombre de voies d'un tel système puisqu'elles sont toutes indépendantes les unes des autres. Néanmoins certaines conditions de rayonnement doivent être vérifiées par les haut-parleurs, ce qui a conduit par exemple à utiliser des sources dipolaires pour le contrôle *diagonal* dans TERIA.



Principe de fonctionnement  
d'une Barrière Active

### La barrière active du site de Malpensa

La barrière active de Malpensa est une antenne de 64 modules montés sur un cadre métallique mobile de 5x5 mètres.

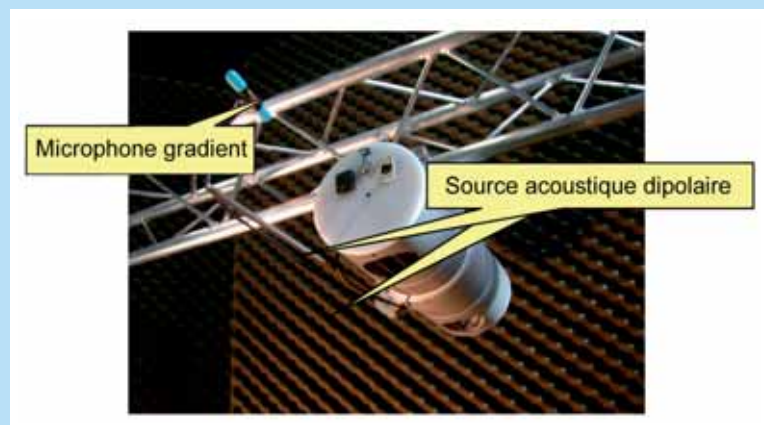
Chaque module est composé d'un haut-parleur de diamètre 17 cm placé dans un tube de protection en PVC lui conférant un rayonnement de directivité dipolaire. Un microphone est fixé à environ 30 cm derrière le module. Tous les modules sont connectés à un rack d'amplification à 64 voies, lui-même raccordé à un contrôleur à 64 voies nommé COBRA. Ce contrôleur, réalisé à l'aide de 16 cartes DSP, est connecté à un ordinateur PC qui permet le chargement d'un algorithme FXLMS-diagonal à 64 voies ainsi que les paramètres de cet algorithme.

Le cadre supportant l'antenne peut pivoter horizontalement et verticalement ce qui lui permet en particulier de pointer 2 cibles :

- 1°) un haut-parleur fixe placé au sommet d'un mât de 10 mètres, situé à environ 30 mètres devant l'antenne, pour le réglage préliminaire du système
- 2°) en direction des avions dans leur phase de décollage pour les tests

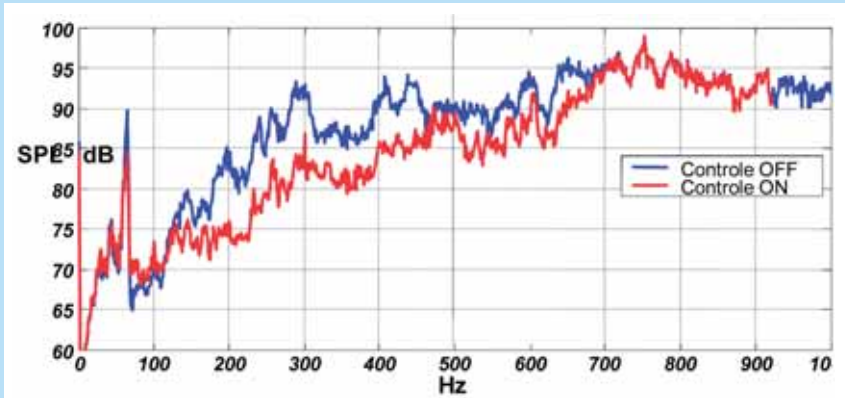
Deux types de microphones de référence peuvent être utilisés :

- > Un microphone omnidirectionnel pour simplifier la mesure dans une première étape
- > Un système de deux microphones hypercardoïdes mis au point par l'EPFL, dans une seconde étape, afin de séparer l'onde directe de l'avion de son écho par le sol. Le contrôle bi-référence qui en découle s'avère alors plus efficace.



Détail d'un module de contrôle

### Performance de la barrière active de Malpensa



*Réduction moyenne mesurée sur les microphones d'erreur du système pour un bruit blanc émis par le haut-parleur du pylône*

La figure suivante montre un résultat typique obtenu avec un bruit blanc envoyé dans la source du pylône. Comme on peut le voir une réduction d'environ 5 à 10 dB est obtenue dans la bande 50-650 Hz

Il est plus difficile d'évaluer les performances de la Barrière Active avec le bruit généré par les avions qui décollent, puisqu'il est absolument impossible d'avoir deux décollages identiques pour les mesurer avec ou sans contrôle. Ce problème fera l'objet d'études ultérieures.

Les performances de l'antenne ont tout d'abord été testées sur un bruit émis par le haut-parleur du pylône. Dans ce cas, les niveaux de bruit sur les microphones d'erreur de l'antenne et sur des microphones d'observation placés derrière celle-ci peuvent être aisément mesurés avec ou sans contrôle.

#### 4.1.2. Protection des espaces intérieurs : Combinaison du contrôle actif/passif du bruit en utilisant des méthodes naturelles d'aération

Centre Scientifique et Technique (D.A.E.) de Grenoble

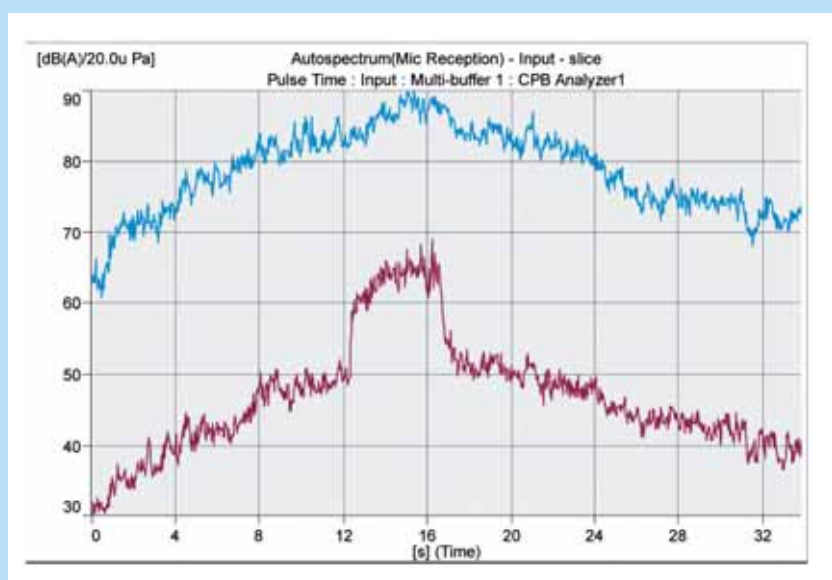
L'idée innovante de la fenêtre active hybride est de combiner une aération naturelle avec un vitrage classique passif.

Le système actif est installée dans trois conduits d'aération de 13x20cm équipés d'un revêtement absorbant, et qui ouverts permettent une ventilation suffisante de la pièce. Dans ce projet, la technique de contrôle actif du bruit employée, comprend plusieurs microphones qui détectent le champ acoustique gênant, des hauts parleurs qui créent le champ sonore secondaire et d'un processeur qui envoie le signal électrique aux haut-parleurs. Plus la section des conduits est réduite et plus le système est efficace sur une bande de fréquences importante. Un haut-parleur, pour traiter essentiellement les basses fréquences, est installé dans chaque conduit de ventilation, dans la partie située à l'extérieur de la maison, juste sur le cadre de la fenêtre. Des microphones positionnés au niveau de l'ouverture des 3 conduits reçoivent le bruit entrant dans la pièce. Le signal reçu par les microphones est envoyé au système de contrôle qui produit un bruit secondaire opposé au bruit de l'avion gênant, produisant ainsi une diminution du niveau sonore à l'intérieur de la pièce.

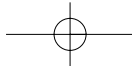


Fenêtre active hybride

Les essais réalisés sur le site de l'aéroport de Milan Malpensa ont montré une atténuation du niveau sonore de l'ordre de 10 dB (A).



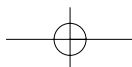
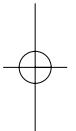
Comparaison des niveaux sonores (en dBA) mesurés à l'extérieur (courbe bleue) et à l'intérieur (courbe rouge) de la maison, lors d'un passage d'avion. Contrôle actif en fonctionnement les douze premières secondes, puis coupé 5 secondes, puis remis en service.



*Fenêtre active vue de l'extérieur (site de Jons)*



*Fenêtre active vue de l'intérieur (site de Jons)*



### 4.1.3. Protéger les espaces intérieurs des bruits externes : fenêtre active

*Laboratoire d'ingénierie Acoustique et Mécanique  
de l'Université Polytechnique de Catalogne*

Au lieu d'étudier les améliorations acoustiques basées sur des techniques passives telles que les fenêtres à double vitrage, l'UPC a étudié d'autres techniques permettant de laisser les fenêtres ouvertes. D'une part, une bonne aération des maisons en été est assurée, et d'autre part, cela permet à l'air frais d'entrer ce qui augmente le confort des habitants.

Dans ce projet, la technique du contrôle actif du bruit est employée. Il s'agit de quelques microphones qui détectent le champ acoustique, de hauts parleurs qui créent le champ secondaire et d'un processeur qui envoie le signal électrique aux haut-parleurs. L'idée est d'installer des fenêtres permettant assez d'aération mais en laissant une petite surface ouverte pour le contrôle actif. Plus la zone active est petite et plus le système est efficace car la zone qui peut être contrôlée par chaque microphone est petite. Une série de trois haut-parleurs a été placée à l'extérieur de la maison, juste sur le cadre de la fenêtre. Sur l'espace libre entre la fenêtre et le cadre de la fenêtre sont placés les microphones qui reçoivent le bruit entrant dans la pièce. Le signal reçu par les microphones est envoyé au système d'acquisition qui traite toutes les données. Le système produit un autre son opposé au son de l'avion qui est émis par le haut-parleur, opérant ainsi une diminution du bruit à l'intérieur de la pièce.

#### Détails techniques

La technique employée pendant cette expérience est l'application du système de contrôle actif du bruit à un espace libre entre le cadre de la fenêtre et la fenêtre. Le système de contrôle actif du bruit utilisé pour cette expérience est un DSP commercial avec un algorithme adaptatif.

Dans ce projet, le LEAM a appliqué un contrôle actif local du bruit sur la fenêtre pour parvenir à une réduction du bruit à l'intérieur de la pièce. Le contrôle actif local du bruit doit réduire la pression du bruit sur une zone donnée, et tenter de ne pas augmenter la pression du bruit sur d'autres zones de la même enceinte. L'application du système de contrôle actif du bruit produit une diminution de l'impédance de la fenêtre ce qui aboutit à une réflexion du son. De fait, la transmission du son dans la pièce est réduite.

Les haut-parleurs ont été placés aussi près que possible des microphones d'erreur afin d'améliorer les résultats. La puissance de la source secondaire dont on a besoin pour réaliser l'annulation au microphone d'erreur est très réduite, et l'atténuation autour du microphone d'erreur est presque contrôlée par les caractéristiques proches du champ de la source secondaire.

Un ou deux microphones d'erreur et deux ou trois haut-parleurs ont été utilisés à chaque expérience pour comparer les résultats. Le signal reçu par les microphones d'erreur a été filtré à l'aide d'un filtre dépassant les 600Hz.

#### 4.1.4. Protection des espaces intérieurs : fenêtre active ouverte

*L'Institut pour les Technologies de la Construction  
du Centre National de la Recherche en Italie*

Le contrôle actif du bruit s'appliquant à une fenêtre ouverte pourrait être la bonne réponse à la demande de riverains d'aéroports : il permet une isolation sonore saine sans avoir à vivre dans un espace clos. Le système installé par l'ITC sur une fenêtre à battant pivotant, se compose d'un microphone de référence, de 5 microphones d'erreurs, d'un haut-parleur de contrôle et d'un contrôleur en temps réel.

Le microphone de référence est placé dehors, devant le bâtiment, face au bruit entrant. Les microphones d'erreur sont distribués dans l'ouverture de la fenêtre et dans les quatre coins de la salle. Le haut-parleur de contrôle se compose de six haut-parleurs inclus dans une boîte simple, accrochée à l'extérieur de la fenêtre.

Les tests montrent que le contrôle devient plus efficace en phase d'atterrissage de l'avion, quand l'influence des composants de basse fréquence est accentuée. Les essais, actuellement en cours sur le site expérimental de Malpensa, visent à préciser cette observation comparativement à l'ouverture de la fenêtre et à l'étude du champ sonore à l'intérieur de la salle.



Fenêtre active ITC

#### 4.1.5 Systèmes électroacoustiques pour le contrôle des bruits extérieurs

*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*

Quelles que soient les modalités du contrôle actif, il faut disposer de systèmes de microphones et de haut-parleurs adaptés à la spécificité du contrôle et à la situation de bruit. Le LEMA s'est intéressé aux systèmes de transducteurs électroacoustiques pour la protection aussi bien d'espaces intérieurs que d'espaces extérieurs ouverts.

La situation de bruit et le mode de contrôle déterminent les performances attendues des équipements, en particulier des systèmes de transducteurs. Un microphone de référence est requis pour capter le bruit primaire à combattre, en un emplacement déterminé, alors qu'un ou plusieurs microphones de contrôle assurent la contre-réaction s'il y a lieu. En principe, le microphone de référence doit répondre aux mêmes exigences fonctionnelles, que ce soit pour une fenêtre active ou une barrière virtuelle.

Les haut-parleurs sont destinés à rayonner le bruit secondaire dans le domaine à protéger. Pour les expérimentations poursuivies dans le projet TERIA, selon les cas, les haut-parleurs sont placés juste devant et de part et d'autre d'une fenêtre (UPC, ITC), intégrés à la structure d'une fenêtre (CSTB), ou encore disposés en un réseau bidimensionnel (CNRS-LMA).

##### Les microphones

Le bruit primaire, en l'occurrence émis par un avion défilant devant une fenêtre par exemple, comporte de multiples contributions. Tout d'abord, il y a de nombreuses causes de bruit, on dira de sources primaires – par exemple les 4 moteurs d'un quadriréacteur, les nombreuses sources aérodynamiques, etc. Un microphone au voisinage du sol va capter cet ensemble en un bruit global direct, l'"onde de ciel", mais aussi leurs réflexions au sol, bruit indirect ou "onde de sol". Plus généralement, le microphone de référence va capter non seulement les ondes de ciel et de sol, mais encore toutes les réflexions susceptibles de se produire sur des obstacles proches d'assez grandes dimensions. Or le CNRS-LMA a démontré que pour les barrières virtuelles, il était impératif de dissocier ces différentes ondes, au moins celles de ciel et de sol, et de les combattre séparément – c'est-à-dire de générer le contre-bruit propre à chacune, sous peine de fortement dégrader les performances du contrôle actif.

Pour l'installation de Malpensa, il a donc fallu prévoir deux microphones de référence, l'un pour l'onde de ciel, le second pour l'onde de sol, suffisamment directifs et orientés de manière appropriée pour assurer une séparation optimale de ces deux ondes.

Il existe de nombreuses techniques pour créer un microphone directif, en l'occurrence unidirectionnel. Classiquement, on recourt à des dispositions acoustiques – microphones cardioïdes par exemple – c'est-à-dire à un mode d'action mixte. On peut aussi envisager un réseau, associant des microphones, dans une géométrie donnée, et un conditionneur électronique. Les microphones de mesure pour l'extérieur étant omnidirectionnels, le LEMA s'est tourné vers des systèmes de tels microphones.

Une directivité appropriée n'est pas la seule exigence et de loin. Il faut absolument travailler en temps réel : l'ensemble du traitement doit se faire en un temps assez en dessous d'une valeur limite liée à la distance entre le microphone de référence et les systèmes de haut-parleurs, dépendant encore du temps de génération du contre-bruit. Or on n'est pas libre de fixer cette distance, que l'on cherche toujours à rendre minimale (cohérence des bruits primaires et secondaires). Ce critère est absolument déterminant dans la réalisation du système de microphones de référence et de son implantation matérielle : diminuer le temps de calcul revêt une importance capitale.

Pour des raisons d'encombrement - et aussi de cohérence du bruit primaire le long du système de référence - et évidemment de coût, on cherche à en diminuer la taille, donc le nombre de microphones, ce qui allège également l'électronique (coût, complexité, temps de calcul). On aboutit alors au concept de système superdirectif, associant un nombre réduit de microphones et un conditionneur analogique ou numérique. Ces systèmes présentent une sensibilité moindre que les réseaux usuels, mais dans le cas particulier du bruit des avions, les niveaux primaires sont suffisamment élevés pour lever l'objection.

Dans ce qui suit, sont présentés succinctement les démarches et travaux entrepris pour la réalisation d'un double système superdirectif pour la barrière virtuelle du CNRS-LMA. Sa fonction principale se résume en la captation séparée de l'onde de ciel et de l'onde de sol.

Pour l'une ou l'autre onde, il s'agit de réaliser une antenne unidirectionnelle pointée dans leur direction moyenne. Les problèmes se posent dans les mêmes termes pour les fenêtres actives. Par ailleurs, il faut obtenir une réjection suffisante des sources secondaires. Les conditions et contraintes climatiques suggèrent le recours à des microphones électrostatiques de mesure omnidirectionnels, prévus pour usage permanent en extérieur, dont plusieurs modèles sont disponibles sans autre sur le marché.

Trois types de réseaux ont été examinés a priori :

- 1) celui classique "broadside"
- 2) celui avec pointage électronique du lobe
- 3) un réseau superdirectif.

Ce dernier présente les avantages suivants :

- il demande le moins de microphones, par contre ceux-ci doivent être bien appariés, ce qui exige une caractérisation et un tri préalables
- il a la plus petite taille et le plus faible encombrement, ce qui le rend plus robuste aux effets du vent et de la turbulence de l'atmosphère, et son installation est plus aisée
- comme toute antenne "endfire", sa directivité présente une symétrie de révolution autour de son axe
- le conditionnement électronique est relativement simple et peut être implanté en analogique ou en numérique.

Des simulations ont montré que des réseaux superdirectifs de 2 et 3 étages (respectivement de 3 et 4 microphones omnidirectionnels écartés de 10 à 15 cm) répondaient aux exigences de bande passante, de sensibilité et de rapport signal/bruit, et leur unidirectionnalité autorise un pointage fixe. L'encombrement longitudinal total avec bonnettes est de 30 à 50 cm. Des expérimentations conduites sur PC à l'aide des logiciels Matlab et LabView, ont permis de valider les solutions préconisées. Toutefois, ces systèmes exigent la linéarisation de leur courbe de réponse par filtrage passe-bas. C'est un inconvénient en traitement numérique, étant donné le délai de groupe impliqué, qui exclut pratiquement les filtres FIR (délais de 15 à 20 ms) au profit de IIR (5 à 10 ms). C'est pourquoi, à la demande du CNRS-LMA, une version analogique, plus rapide, a été étudiée et réalisée. On ne peut cependant exclure qu'une implantation future sur un DSP soit plus performante.

Quelle que soit la technologie, digitale ou analogique, l'appariement des microphones est une condition sine qua non – non seulement en module mais aussi en phase – qu'il faut réaliser au plus près. À ce point de vue, il s'agit aussi de définir les structures nécessitant le moins de microphones. Les systèmes superdirectifs sont les plus favorables à cet égard.

## Les haut-parleurs

Un système haut-parleur est l'association d'un haut-parleur, ou driver, et d'une enceinte. Un haut-parleur n'est pas conçu pour un montage sans enceinte et normalement un tel fonctionnement est exclu - du moins peu recommandé étant donné la dégradation sensible des performances qui en résulte. Toutefois, certaines applications le nécessitent. C'est notamment le cas des haut-parleurs de la barrière virtuelle du CNRS-LMA, dont les sources doivent être bidirectionnelles, ce qu'est précisément un haut-parleur libre ou sur un petit écran.

Classiquement, on distingue les enceintes closes et ouvertes. Les closes sont préférables aux ouvertes, car présentant à performances comparables, un retard de groupe plus faible. Par ailleurs l'évent des ouvertes est perturbé par le vent et les intempéries.

Les exigences déterminantes dans la réalisation d'un système haut-parleur sont : le volume intérieur de l'enceinte (donc l'encombrement), sa fréquence de coupure inférieure, son rendement énergétique et la puissance acoustique rayonnée maximale sans distorsion excessive. On démontre que ces exigences ne peuvent être fixées librement, mais sont liées par des formules pratiquement indépendantes de la charge acoustique.

Une enceinte close est peu directive : en première approximation, on peut la considérer omnidirectionnelle, du moins dans la partie inférieure de sa bande passante ; aux fréquences élevées elle est peu ou prou unidirectionnelle.

Pour les fenêtres actives, les exigences de base précitées découlent :

- de la limite inférieure de la bande passante choisie, laquelle fixe la fréquence de coupure
- de l'emplacement prévu pour le système haut-parleur relativement à la fenêtre à protéger, déterminant l'encombrement total donc le volume maximal admissible
- du niveau de crête maximum du bruit primaire à combattre, lequel détermine la puissance acoustique minimale nécessaire.

À partir de ces données on effectue le calcul du système haut-parleur, c'est-à-dire de l'enceinte et du haut-parleur. Ce dernier est finalement spécifié par les valeurs de ses paramètres de Thiele-Small. A ce stade, il n'est pas certain du tout qu'il existe sur le marché un haut-parleur présentant ces caractéristiques. Dans le meilleur des cas, on trouvera chez un constructeur un haut-parleur de spécifications voisines et des concessions seront à faire sur les performances. Usuellement, il faut demander une exécution spéciale d'un haut-parleur en vue de le rapprocher au mieux des caractéristiques demandées. Cette problématique est tout à fait générale, mais elle est particulièrement aiguë pour les fenêtres actives, car il faut absolument obtenir un encombrement minimum.

Le système haut-parleur prototype conçu et réalisé pour la fenêtre active de l'ITC en est un bon exemple. Après discussion des différentes possibilités, il a été décidé de réaliser une enceinte close qui prendrait la place et aurait l'apparence d'un caisson de store. La place à disposition a défini les dimensions extérieures de l'enceinte (largeur : 1,30 m ; hauteur : 0,50 m ; profondeur : 0,30 m). On s'est basé sur un encombrement de 150 dm<sup>3</sup>. La bande de fréquence de contrôle envisagée va grosso modo de 40 Hz à 400 Hz, la coupure basse de 40 Hz découlant de l'analyse des spectres de bruit de passages d'aéronefs. Le niveau global du bruit primaire mesuré a atteint des valeurs de plus de 100 dB dans le plan du vitrage ou juste devant la fenêtre. Une estimation est un niveau secondaire au moins égal dans le plan de la fenêtre. Il n'y a aucune indication sur les produits de distorsion admissibles, mais il est demandé de les réduire autant que possible. En fait, pour une excitation à large bande comme un bruit d'avion, la distorsion harmonique est dénuée de sens et l'on a opté pour un critère de cohérence, quantifiant le degré de linéarité entre la réponse et l'excitation d'un système. En vue d'une réalisation à court terme afin de permettre les essais à partir de juin 2005, on a décidé du choix d'un haut-parleur a priori et on a donc effectué une synthèse "forcée", qui ne peut être optimale. Le haut-parleur utilisé présente des caractéristiques qui ont permis d'aboutir à une réalisation satisfaisante. De plus, sa tenue en extérieur est excellente. En vue d'obtenir une distorsion minimale, on a mis en œuvre six haut-parleurs en parallèle. La maîtrise de la courbe de réponse s'est faite en augmentant le facteur de qualité par une résistance série – ce qui est peu orthodoxe – au détriment du rendement. Finalement, c'est la nécessité d'une fréquence de coupure basse de 40 Hz qui a conditionné cette réalisation. En la remontant d'une octave, l'encombrement pourrait être divisé par huit.

C'est pourquoi, le LEMA a étudié la possibilité de contrôler les fréquences basses (en dessous de 100 à 200 Hz environ) par un haut-parleur placé à l'intérieur du local à protéger (contrôle modal), ce qui conduit à un allègement considérable des exigences des systèmes haut-parleurs placés à l'extérieur.

Comme décrit précédemment, un haut-parleur libre ou sur petit écran est bidirectionnel, mais rayonne beaucoup moins bien que sur une enceinte. Pour une même pression acoustique, la vitesse du diaphragme du haut-parleur libre devrait grosso modo être l'octuple de celle sur enceinte, de même son élongation. Or celle-ci est limitée à quelques mm, au risque de dommages, à tout le moins d'une distorsion excessive. Le choix du haut-parleur devrait se faire sur la base de son élongation maximale et de la surface du diaphragme. Par ailleurs, un haut-parleur libre est amené à subir des excitations électriques très élevées et les puissances dissipées deviennent considérables.

Pour conclure, le montage d'un haut-parleur sur un baffle ou un dispositif analogue – au milieu d'un tube en mode plan par exemple – est possible, mais exige une analyse soignée des conditions de fonctionnement. La fréquence limite inférieure est très critique, car elle est liée à la taille des haut-parleurs. Il conviendrait de choisir ceux-ci, puis de décider de la fréquence inférieure en fonction des contraintes électriques et des performances, notamment de la cohérence.

## 5. LIGNES DIRECTRICES POUR LE CONTRÔLE ACTIF EN ESPACE CLOS

Ces lignes directrices résument les principales démarches à suivre en vue du contrôle actif du bruit dans des locaux. Dans le cadre du projet TERIA, plusieurs partenaires ont développé et expérimenté de tels systèmes que l'on peut regrouper sous le terme générique de fenêtre active.

De manière générale, une situation d'exposition au bruit est définie par les éléments suivants :

- les personnes exposées et leurs activités, par exemple, habitations, écoles, bureaux, ateliers, etc., ce qui fixe les valeurs limites à respecter dans chaque cas
- l'exposition au bruit, établie par les méthodes reconnues normalisées et spécifiée par un indicateur ad hoc - en Suisse, un niveau d'évaluation  $L_r$  en dB(A).

L'analyse de ces données permet de conclure quant à la nécessité ou non d'un assainissement, et si oui, de fixer un objectif de réduction de bruit en termes d'une diminution planifiée du niveau d'évaluation.

Dans ce qui suit, on ne traite pas de ces démarches, relativement classiques. On se place dans l'hypothèse qu'un assainissement est requis et que la réduction est planifiée sous forme d'une valeur planifiée d'un indicateur de l'exposition au bruit.

Le premier problème est d'évaluer la faisabilité de la réduction escomptée par la technique active envisagée, par exemple l'une ou l'autre des fenêtres actives des différents partenaires de TERIA.

Cette question doit donner lieu à un avant-projet, lequel définit les moyens à engager et la manière de les installer, et les coûts impliqués, accompagnés éventuellement de dispositions complémentaires.

On ne pourra y répondre pleinement que lorsque les expérimentations auront été menées à bien et que les conditions d'installation et le mode opératoire - essais et mesures préalables - seront complètement définis.

## Proposition de lignes guides générales

Les étapes suivantes sont proposées :

### 1 - Caractérisation des bruits primaires

Il s'agit de caractériser les ondes de ciel et de sol, et d'éventuelles autres réflexions. Des mesures in situ permettent de trouver les grandeurs suivantes :

- évolutions temporelles des spectres (FFT, sonogrammes)
- évolutions temporelles des niveaux globaux en dB(Z)
- durées des passages, définies par exemple par les instants de début et de fin pour lesquels les niveaux sont de 10 dB en dessous de celui maximal observé
- évolutions temporelles des directions d'incidence.

Ces caractéristiques sont à déterminer devant la fenêtre, à l'emplacement prévisible du système de microphone de référence. La mise en œuvre d'un goniomètre (en temps réel ou différé) devrait grandement faciliter la mesure de l'évolution temporelle des directions d'incidence des ondes de ciel et de sol (mesures continues de l'azimut et du site). Ces opérations devraient être effectuées pour différents types d'aéronefs et les différents scénarios de décollage.

### 2 - Caractérisation de l'espace à protéger

Comme les expérimentations et mesures l'ont montré pour le site de Vernier, disposer une petite enceinte close à l'intérieur du local - en un coin supérieur - est une excellente solution pour les basses et très basses fréquences, domaine dans lequel le contrôle modal est justifié. Les exigences sur les haut-parleurs sont alors considérablement allégées par rapport à celles de haut-parleurs extérieurs. Typiquement, la fréquence de séparation entre les contrôles intérieur et extérieur se situe entre 100 et 200 Hz.

Les mêmes mesures qu'au point 1 ci-dessus, sont à faire dans le local, aux emplacements où se trouvent les personnes, mais aussi dans les positions envisageables - en principe dans les coins supérieurs du local ou au plus près - pour le haut-parleur de contrôle modal et le microphone de feedback, s'il y a lieu.

Par ailleurs, il est essentiel de déterminer les modes et fréquences propres et la réponse du local par calculs et/ou mesures.

### 3 – Élaboration du cahier des charges des systèmes électroacoustiques.

L'ensemble des exigences des systèmes de transducteurs électroacoustiques est défini comme suit :

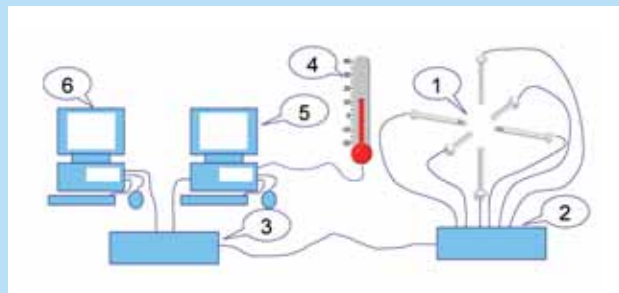
- les systèmes de microphones de référence sont à concevoir selon les résultats de la première étape ; des systèmes superdirectifs avec conditionnement numérique sont à préférer
- les systèmes haut-parleurs comprennent deux voies : une enceinte close dans le local pour la bande inférieure de fréquence et une à l'extérieur, au-dessus ou à côté de la fenêtre, pour la bande supérieure ; ces systèmes doivent être conçus selon les résultats des étapes 1 et 2, la fréquence de séparation étant à décider au voisinage de la fréquence de Schroeder (densité des modes).

Il est évident que les différents coûts – études, équipements, installation et mise en exploitation - constituent un élément clé. Il y aurait notamment lieu d'optimiser la méthodologie.

## 6. NOUVELLES TECHNIQUES D'ÉVALUATION DU BRUIT AÉROPORTUAIRE ET ASPECTS ÉPIDÉMIOLOGIQUES

### 6.1 Identification des sources du bruit

Le Polytechnique de Milan est chargé de créer un système de contrôle de la pression acoustique à long terme ainsi qu'un système mesurant son intensité, basé sur des instruments virtuels. Six microphones peu espacés (1) sont placés sur le site expérimental de Malpensa à environ 6 mètres au-dessus du sol. La pression acoustique mesurée par chaque microphone est filtrée et amplifiée au moyen d'un amplificateur (2) placé sur le sol à proximité des microphones. Les informations sont ensuite converties en A/D avec un tableau d'acquisition de 24 bits. Un ordinateur (5) est doté d'un logiciel de contrôle de la pression acoustique en continu alors qu'un autre (6) mesure l'intensité du son.



L'utilisation d'un instrument virtuel plutôt que celle d'un outil traditionnel renforce les performances de la sonde d'intensité ainsi que celles de la mesure du bruit puisqu'elle permet un large éventail de correction des algorithmes qu'un capteur traditionnel ne réussirait pas. Un système par PC donne également accès à des ressources "infinies" de mémoire, facilitant ainsi la tâche de contrôle à long terme. L'emploi d'instruments virtuels facilite aussi des opérations qui sont simples quant à leur conception mais difficilement transposables à l'instrumentalisation normalisée, telle que la réduction de l'incertitude qui peut être obtenue au moyen d'un thermomètre additionnel et d'un hydromètre pour évaluer la densité instantanée de l'air.

#### Les mesures de la pression acoustique

La pression est mesurée en continu au moyen d'un ordinateur avec un instrument virtuel. Ce système de mesure remplit les exigences de la classe 1 IEC 61672 et permet des mesures de niveau de pression continue "rapide" et "lente". De plus, le programme enregistre les niveaux de bandes à 1/3 d'octave sur un ordre de fréquence de 20Hz-20kHz.

#### Les mesures de l'intensité du son

Le vecteur d'intensité du son fournit une information de base sur la surveillance des bruits liés aux aéroports car il indique la direction du flux d'énergie acoustique. Au moyen d'une sonde d'intensité en 3 dimensions, il est par exemple possible de séparer la contribution de l'avion de celle produite par le terminale de l'aéroport.

L'intensité du son est mesurée avec la méthode connue des deux microphones. Le vecteur d'intensité du son en 3D est mesuré grâce à 6 microphones (avec une sensibilité nominale de 50 Mv/ Pa et un diamètre d'1/4 de pouce) qui composent 3 sondes d'intensité perpendiculaires entre elles. La distance entre les microphones est fixée par un cadre spécifique, conçu pour réduire les effets de charge de la sonde d'intensité. Une couche de coton protège les microphones de la pluie et de la neige sans que cela n'affecte les caractéristiques météorologiques de la sonde en 3D.

L'usage d'un instrument virtuel permet de mesurer l'intensité avec tous les couples de microphones disponibles (non seulement celui aligné sur le même axe de mesure, mais aussi les couples composés de transducteurs perpendiculaires). De plus, il est possible d'établir des rectificatifs d'algorithmes pour compenser les erreurs dues au principe de mesure et aux caractéristiques météorologiques des transducteurs. Comme mentionné précédemment, la densité de l'air et la vitesse du son sont calculées en continu en fonction de la température de l'air et de l'humidité. L'utilisation de tous les moyens cités plus haut permet d'obtenir une largeur de bande deux fois plus grande que celle d'un appareil du commerce. L'intensité du son est stockée seulement si le niveau de pression du son dépasse 64 dB pendant plus de 8 secondes. Cela réduit le volume d'informations stockées (même si un jour de contrôle représente approximativement 2Gb d'information).

## 6.2 Étude et analyse des facteurs de nuisances sonores autour des aéroports

L'objet de l'étude réalisée par le Gouvernement des Îles Baléares est de mieux appréhender le type de gêne ressentie par les riverains de l'aéroport de Palma de Majorque. Une grande difficulté de l'étude est de réaliser un échantillonnage représentatif de la population touchée, qui doit tenir compte des facteurs géographiques, sociaux et humains.

Le questionnaire d'enquête comprend une partie permettant de qualifier la personne enquêtée et une deuxième partie liée à la perception de la gêne sonore. Les résultats permettent ainsi d'établir une analyse statistique précise de la gêne ressentie et des adaptations mises en œuvre, par rapport aux critères d'éloignement géographique, du mode de vie et de l'activité des personnes riveraines.

## 7. ÉVALUATION DES RÉSULTATS DES SYSTÈMES ACTIFS : SUGGESTIONS ISSUES DU PROJET

Les résultats d'un système actif peuvent être évalués sur la largeur de fréquence habituellement limitée des opérations qui dépend :

- la géométrie de système
- arrangements de DSP
- la réponse des déclencheurs

Pour toutes fenêtres actives (CSTB, UPC, CNR), les systèmes luttent contre le bruit au-dessous de 600÷800 hertz. L'augmentation de l'isolation peut donc être évaluée dans cette largeur de fréquence. Ce type de mesures, toutefois, pourrait être mieux approprié à l'optimisation de systèmes plutôt qu'aux évaluations standards. Tous les partenaires ont rencontré des difficultés alors qu'ils tentaient de synthétiser leurs résultats grâce à un paramètre standard car la largeur de fréquence des normes mentionnées couvre juste une petite partie de la largeur du contrôle actif. La manière la plus efficace de parvenir au but est probablement de développer la gamme de 717 courbes, ou mieux : de définir une nouvelle courbe pour l'évaluation d'ANCS en conservant la méthodologie standard courante. L'utilisation de l'isolation exprimée comme une différence de niveaux de dB(A) ne semble pas être fiable actuellement.

L'observation des résultats de tous les systèmes testés dans le projet Teria, en terme de temps et de fréquence, suggère que pour le moment, l'expression la plus significative des résultats doit être limitée à une bande. Par exemple, un système atténuant un bruit de 15db à 100 Hertz peut être envisagé pour fournir de bons résultats, mais ces derniers sont parfois masqués par des index globaux tels que  $R_w$ ,  $D_n$  et dB(A).

Les approches statistiques valent la peine d'être suivies en tant que méthodes d'évaluation d'étalonnage. Pour avoir une grande base statistique, elles exigent que le système ANC puisse être laissé presque sans surveillance sans risque de divergence pendant de courtes ou longues périodes et en présence de "fausses" nuisances (comme le vent, les bruits de la nature, les bruits venant de l'intérieur de la maison). Les systèmes doivent également avoir des capacités de surveillance et d'auto diagnostique. De tels problèmes doivent être résolus afin d'avoir un produit prêt pour le marché, indépendamment des considérations expérimentales.

La plupart des partenaires s'accordent à dire que la méthode d'évaluation la plus efficace pour des mesures est la désactivation soudaine du contrôle actif pendant l'événement. Cette approche est assurément la plus efficace pour une évaluation subjective, mais doit encore être caractérisée en termes d'incertitude, puisque toute l'analyse commune de fréquence de temps faite ici et dans la littérature montre combien les spectres changent dans le temps. C'est probablement la plus efficace aussi dans l'étape d'évaluation de praticabilité, puisque ses résultats sont immédiats.

Des changements de champ acoustique dus à l'activité du contrôle actif pourraient être exprimés en niveaux de pression acoustique (en fréquence et en temps) par rapport à un commutateur (marche-arrêt) du système. La fiabilité des résultats, là encore, semble être garantie seulement si un bruit que l'on peut répéter vient au contrôleur ; c'est-à-dire, produit avec un haut-parleur. Un bon compromis entre les nécessités expérimentales et les dispositifs réels pourrait être obtenu avec un haut-parleur se déplaçant sans interruption ou par étapes ou même avec un système des haut-parleurs correctement coordonnés.

Une sonde d'intensité 3D peut être très utile pour étudier l'influence de l'angle d'incident sur les résultats d'isolation de fenêtre. Elle exige alors l'utilisation de plusieurs microphones fixés dans la salle de réception fonctionnant simultanément plutôt qu'un microphone de rotation simple. De cette façon l'évaluation du niveau de pression acoustique dans la salle de réception peut être obtenue avec le temps pendant que l'angle incident change. L'utilisation d'un microphone de rotation fournit seulement un niveau de pression acoustique estimé ramené à une moyenne au-dessus de tous les angles couverts par le champ incident.

Afin d'éviter la perturbation non désirée et améliorer l'efficacité il est possible d'employer des techniques de concordance entre le bruit avant et après le dispositif du contrôle actif, donc sur un signal d'intensité au lieu de la pression acoustique. De cette façon il est possible de distinguer la contribution au niveau intérieur venant du bruit aéroportuaire.

## CONTACTS TERIA

### CHEF DE FILE

#### Regione Lombardia

Contact : Nadia LANESE

Fonction : Responsable dell'Unita Organizzativa Pianificazione e Programmazione Territoriale

Adresse : Via Sasseti, 32/2-20124 MILANO

Tél. : 39 02 /6765.5411 - Fax : 39 02/6765.6716

E-mail : nadia\_lanese@regione.lombardia.it

### PARTENAIRE 1

#### CNR-ITC

(Consiglio Nazionale delle Ricerche-Instituto per le Tecnologie della Costruzione)

Contact : Fabio SCAMONI

Fonction : Ricercatore del CNR-ITC

Adresse : Via Lombardia, 49 - 20098 SAN GIULIANO MILANESE - ITALIA

Tél. : 39 02 9806.210 - Fax : 39 02 9828.0088

E-mail : fabio.scamoni@itc.cnr.it

### PARTENAIRE 2

#### Provincia di Varese

Contact : Alberto CAVERZASI

Fonction : Dirigente del Settore Urbanistica e Territorio

Adresse : Via Pasubio, 6- 21100 VARESE - ITALIA

Tél. : 39 03 3225.2828 - Fax : 39 03 3225.2804

E-mail : albertcaverzasi@provincia.va.it

### PARTENAIRE 3

#### Provincia di Novara

Contact : Silvano BRUSTIA

Fonction : Funzionario del Settore Urbanistica, Affari Speciali e Trasporti

Adresse : Piazza Matteotti, 1 - 28100 NOVARA - ITALIA

Tél. : 39 03 2137.8323 - Fax : 39 03 2137. 8308

E-mail : provincc@provincia.novara.it

### PARTENAIRE 4

#### POLIMI ( Politecnico di Milano)

Contact : Giovanni MOSCHIONI

Fonction : Ricercatore del Politecnico di Milano

Adresse : Corso Matteotti, 2 - 23900 LECCO - ITALIA

Tél. : 39 03 4148.8710 - Fax : 39 03 4148.8701

E-mail : giovanni.moschioni@polimi.it

**PARTENAIRE 5****Govern de les Îlles Balears**

Contact : Dolores ORDOÑEZ

Fonction : Responsable des initiatives et des projets européens

Adresse : Palau Reial, 17- 07001 PALMA- ESPAGNE

Tél. : 34 971-177667 - Fax : 34 971-176074

E-mail : dordoneyez@dgeconomia.caib.es

**PARTENAIRE 6****Université Polytechnique de Catalogne (UPC)**

Contact : Jordi ROMEU GARDI

Fonction : Director del LEAM

Adresse : C/ Colon n°11- 08222 TERRASSA- ESPAGNE

Tél. : 34 93 739.8061 - Fax : 34 93 739.8101

E-mail : jordi.romeu@upc.es

**PARTENAIRE 7****Chambre de Commerce et d'Industrie de Lyon**

Contact : Rémi LEDYS

Fonction : Animateur du Pôle Qualité-Sécurité- Environnement

Adresse : Place de la Bourse- 69289 LYON- FRANCE

Tél. : 04 72 40 57 26 - Fax : 04 72 40 59 65

E-mail : ledys@lyon.cci.fr

**PARTENAIRE 8****Centre National de la Recherche Scientifique de Marseille (CNRS)**

Contact : Alain ROURE

Fonction : Ingénieur de Recherche au LMA

Adresse : LMA du CNRS- 31 Chemin Joseph Aiguier- 13402 MARSEILLE Cedex 20

Tél. : 04 91 16 40 82 - Fax : 04 91 16 40 80

E-mail : roure@lma.cnrs-mrs.fr

**PARTENAIRE 9****Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble (CSTB)**

Contact : Julien MAILLARD

Fonction : Ingénieur de Recherche au CSTB

Adresse : 24 Rue Joseph Fourier- 38400 ST MARTIN D'HERES

Tél. : 04 76 76 25 21 - Fax : 04 76 44 20 46

E-mail : j.maillard@cstb.fr

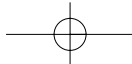
**PARTENAIRE 10****École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)****Laboratoire d Electromagnetisme et d Acoustique (LEMA)**

Contact : Hervé LISSEK

Adresse : LEMA-EPFL- CH 1015 LAUSANNE - SUISSE

Tél. : 41 21 69 34 630 - Fax : 41 21 69 32 673

E-mail : herve.lissek@epfl.ch




# TERIA

Territorial Insert of Airports

[www.teria-itc.cnr.it](http://www.teria-itc.cnr.it)

### Contact France

Rémi Ledys

Tél. +33 (0)4 72 40 57 26

E.mail : [ledys@lyon.cci.fr](mailto:ledys@lyon.cci.fr)



Ce projet est cofinancé par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER)

