

# ACOUBAIE

## Etude de faisabilité

Modélisation par calcul de la performance acoustique de fenêtre bois



### Siège social

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Marne  
Tél +33 (0)1 72 84 97 84  
[www.fcba.fr](http://www.fcba.fr)

Siret 775 680 903 00132  
APE 7219Z  
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :  
Forêt, Cellulose, Bois – Construction,  
Ameublement

Le 4 septembre 2017

Avec le soutien du

## **DOMAINE D'APPLICATION**

Ce document traite des performances acoustiques des fenêtres et portes fenêtres en bois conformes aux spécifications techniques de la norme NF P 23 305 en France Métropolitaine.

## **CONTEXTE**

Les performances acoustiques des enveloppes des bâtiments sont liées à celles des baies. Ces mêmes baies ont des performances liées à celles des menuiseries, des vitrages, des profilés d'étanchéité, de la mise en œuvre dans l'ossature, des entrées d'air, d'éventuels coffres de volets roulants, etc...

Aujourd'hui, il n'existe pas d'autres choix que de qualifier expérimentalement la performance acoustique des menuiseries (via des essais demandant des investissements lourds au regard de la taille des entreprises du secteur) ou de se baser sur des valeurs forfaitaires pénalisantes et limitées en terme de configuration de produit (soubassement,  $R_{A,tr} > 34$  dB sont par exemple exclus). L'approche de modélisation est quasi inexistante.

## **OBJECTIF**

L'objectif final, visé par les demandeurs, consiste à élaborer un outil de calcul des performances acoustiques de fenêtres. Cet outil devra permettre d'obtenir des valeurs de performances acoustiques telles que celles affichées aujourd'hui en supprimant, partiellement ou totalement, les mesures en laboratoire.

L'objet de la présente étude est de faire un état des lieux des modes d'évaluations actuels et de vérifier la faisabilité de cet objectif final, en s'appuyant notamment sur les éléments de l'étude R&D ACOU-BAIE de 2003 - 2006.

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>La réglementation acoustique dans le bâtiment neuf .....</b>	<b>5</b>
1.1	L'isolement au bruit extérieur requis par la façade .....	5
1.2	L'attestation de prise en compte de la réglementation acoustique.....	6
1.3	Exemples de Solutions Acoustiques (ESA) conformes à la réglementation acoustique .....	7
1.4	Les classes de performances ESA des fenêtres .....	7
<b>2.</b>	<b>Performance acoustique d'une fenêtre .....</b>	<b>9</b>
2.1	Modes d'évaluation actuel.....	9
2.2	Valeur tabulée.....	9
2.3	Extension des résultats .....	10
2.4	Projet de valeur par interpolation.....	10
<b>3.</b>	<b>Comportement acoustique d'une fenêtre.....</b>	<b>12</b>
3.1	Les facteurs influents .....	12
3.2	Système Masse – Ressort - Masse.....	13
3.3	Les systèmes multicouches .....	14
3.3.1	Vitrage isolant .....	14
3.3.2	Les remplissages opaques .....	17
3.4	Fuite acoustique liée à la perméabilité à l'air de la fenêtre .....	17
3.4.1	Mesure et modélisation de la perméabilité à l'air de la fenêtre .....	17
3.4.2	Lien entre fuite acoustique et perméabilité à l'air de la fenêtre .....	17
3.4.3	Principe de modélisation d'une fuite acoustique liée à fuite à l'air .....	18
3.4.4	Modélisation de la performance acoustique de la liaison ouvrant dormant.....	20
<b>4.</b>	<b>Méthodes de modélisation par calcul.....</b>	<b>22</b>
4.1	Méthode analytique TMM (Transfer Matrix Method) .....	22
4.2	Méthode de FEM (Finit Element Method).....	22
4.3	Méthode énergétique SEA (Statistical Energy Analysis) .....	23
<b>5.</b>	<b>L'étude R&amp;D ACOU-BAIE.....</b>	<b>24</b>
5.1	Phase 1 de l'étude : premier schéma de modèle.....	24
5.2	Phase 2 de l'étude : optimisation des 2 modèles.....	28
5.2.1	Expérimentation SEA inverse sur porte-fenêtre et fenêtre .....	28
5.2.2	Expérimentation modèle acoustif.....	29
5.3	Phase 3 de l'étude : modélisation complète sur un bloc-baie avec entrée d'air .....	31
<b>6.</b>	<b>Faisabilité adaptation du modèle ACOU BAIE par type de besoins des professionnels.....</b>	<b>34</b>
<b>7.</b>	<b>Analyse du besoin pour consolider le modèle de calcul ACOU BAIE.....</b>	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>36</b>

## LEXIQUE

**Bloc baie ou bloc fenêtre** : Ensemble autonome constitué d'une fenêtre avec son coffre ou d'une fenêtre avec sa fermeture. Cet ensemble est l'objet d'une seule commande. L'ensemble est posé en une seule opération assurant le clos du bâtiment.

### **Porte-fenêtre**

Fenêtre permettant le passage des personnes

### **DnT,A,tr**

Isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic. Il correspond à l'isolement de la façade mesuré sur le site. Il est mesuré en dB.

### **Classes AC**

Classes de niveau de performances acoustiques, définies par la certification ACOTHERM pour les fenêtres. Quatre classes de performances sont retenues à partir des  $R_{A,tr}$  mesurés : AC0, AC1, AC2, AC3, AC4.

### **Classes AR**

Classes de niveau de performances acoustiques, définies par la certification CEKAL pour les vitrages. Six classes de performances sont retenues à partir des  $R_{A,tr}$  mesurés : AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6.

### **Classes ESA**

il existe des ESA (Exemples de Solutions Acoustiques) pour chaque ouvrage des bâtiments donnant des descriptions de mise en oeuvre permettant d'accéder aux niveaux règlementaires.

La qualité acoustique des produits (ou systèmes) est appréciée sur une échelle de classes de performances croissantes ESA1, ESA2, ESA3, ESA4, ESA5, ESA6.

### **Décibel (dB)**

Unité physique permettant d'évaluer le niveau de pression généré, en un point, par un bruit. Il peut également être utilisé, sous la forme d'un indice, pour caractériser les performances acoustiques d'un ouvrage.

### **Décibel pondéré A (dB(A))**

Unité physiologique qui prend en compte la sensibilité de l'oreille humaine. On l'utilise pour évaluer le caractère gênant d'un bruit et l'exposition d'une façade.

### **Dn,e,w + Ctr**

Isolement acoustique normalisé pondéré d'une entrée d'air ou d'un coffre de volet roulant pour un bruit de trafic. Il est mesuré en laboratoire. Il est exprimé en dB.

### **LA,eq,T**

Niveau continu équivalent pondéré A. Indicateur utilisé pour caractériser, au moyen d'une seule valeur les bruits fluctuants atteignant une façade pendant la période T. Il représente une moyenne. Il est exprimé en dB(A).

### **$R_{A,tr}$**

Indice d'affaiblissement pondéré utilisé pour caractériser la capacité d'isolement aux bruits aériens d'origine routière (bruits de trafic) ; on a  $R_{A,tr} = R_w + C_{tr}$  ; l'indice est exprimé en dB.

### **$R_w$ (C ; Ctr)**

Indice d'affaiblissement acoustique pondéré selon la norme EN ISO 717-1, utilisé pour caractériser la capacité d'isolement d'un ouvrage, par exemple une fenêtre, aux bruits aériens ; l'indice est mesuré en laboratoire dans des conditions déterminées reproductibles. Il est exprimé en dB.

**Evaluation de Type Initiale (ETI) ou essai de type** : Un essai de type initial est l'ensemble complet des essais ou autres modes opératoires en rapport avec les caractéristiques à évaluer, qui permet de déterminer les performances des échantillons de produits représentatifs du type de produit.

**CPU ou Contrôle de Production Usine** : le système CPU consiste en des procédures écrites, des contrôles réguliers, des essais et/ou vérifications et l'utilisation des résultats pour contrôler les composants de base, le procédé de production et le produit.

## **REFERENCES NORMATIVES**

NF P 23-305, Menuiserie en Bois – Spécifications techniques des fenêtres, portes-fenêtres, portes extérieures et ensemble menuisés en bois (indice de classement P23-305)

NF EN 14351-1+A1, Fenêtres et portes – Norme produit, caractéristiques de performance –Partie 1 : Fenêtres et blocs portes extérieurs pour piétons sans caractéristiques de résistance au feu et/ou dégagement de fumée (indice de classement P20-500-1).

NF E 51-732, Composants de ventilation mécanique contrôlée - Entrées d'air en façade caractéristiques et aptitude à la fonction

NF EN 1279-5+A2, Verre dans la construction - Vitrage isolant préfabriqué scellé - Partie 5 : évaluation de la conformité

NF EN 12758, Verre dans la construction - Vitrages et isolement acoustique - Descriptions de produits et détermination des propriétés

NF EN 12 354-3, Acoustique du bâtiment - Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments - Partie 3 : isolement aux bruits aériens venus de l'extérieur

NF EN 10140-2, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 2 : mesurage de l'isolation au bruit aérien

NF EN 717-1, Acoustique - Évaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction - Partie 1 : isolement aux bruits aériens

# 1. La réglementation acoustique dans le bâtiment neuf

Tous les bâtiments à construire (habitation ou recevant du public), quelle que soit leur destination, doivent présenter des caractéristiques acoustiques minimales. Parmi ces caractéristiques acoustiques, celles qui nous intéressent particulièrement pour cette étude, est l'isolement vis à vis des bruits extérieurs.

## 1.1 L'isolement au bruit extérieur requis par la façade

L'indicateur pour évaluer l'isolement aux bruits extérieurs d'une façade est le  $D_{nT,A,tr}$  exprimé en dB. Il correspond à la différence entre le niveau mesuré en façade et le niveau mesuré à l'intérieur. Si le niveau du bruit routier en façade est de 70 dB(A) et si le niveau intérieur souhaité est de 35 dB(A), l'isolement  $D_{nT,A,tr}$  offert par la façade devra atteindre 35 dB.

**L'arrêté du 30 mai 1996** (relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolement acoustique des projets de bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit) fixe les règles de calcul des isollements acoustiques de façade à imposer aux projets de bâtiments, notamment d'habitation, en sites bruyants exposés au bruit des infrastructures de transport.

Les infrastructures de transports terrestres sont classées en cinq catégories de 1 à 5, de la plus bruyante à la moins bruyante.

Réglementairement, le classement de voies est publié par arrêté préfectoral et est disponible auprès des mairies ou des DDE du département du lieu de construction. L'isolement acoustique  $D_{nT,A,tr}$  requis pour la façade du bâtiment concerné est fourni par le tableau suivant en fonction de la catégorie de la voie et de la distance du bâtiment à la voie :

ISOLEMENT AUX BRUITS EXTERIEURS $D_{nT,A,tr}$ (en dB)															
Distance en m	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-40	40-50	50-65	65-80	80-100	100-125	125-160	160-200	200-250	250-300
Catégorie															
1	45	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32
2	42	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	
3	38	38	37	36	35	34	33	32	31	30					
4	35	33	32	31	30										
5	30														

**Tableau 1** : L'isolement aux bruits extérieurs  $D_{nT,A,tr}$  requis pour la façade du bâtiment en fonction de la catégorie de la voie et de la distance du bâtiment à la voie

A titre d'exemple :

### Isolement $D_{nT,A,tr}$ de 30 dB :

Il permet de protéger les logements faiblement exposés au bruit, situés dans les rues dont le débit horaire diurne ne dépasse pas 150 véhicules/heure (moins de 2 véhicules/minute).

### Isolement $D_{nT,A,tr}$ de 35 dB :

Il est adapté à la protection des constructions moyennement exposées, en bordure de rue dont le trafic ne dépasse pas 500 véhicules/heure (moins de 8 véhicules/minute).

**Ce qu'il faut retenir :**

- La réglementation française a fixé pour les logements neufs un isolement aux bruits extérieurs ( $D_{nT,A,tr}$ ) requis par la façade de au moins 30dB (tableau 1),
- La majorité des conditions d'exposition des logements neufs correspondent à un  $D_{nT,A,tr}$  de 30dB,
- La réglementation française n'impose aucun isolement minimum pour les fenêtres,
- A partir de 38db d'isolement de façade, les entrées d'air (EA) et coffres de volet roulant sont des facteurs très limitants.

**1.2 L'attestation de prise en compte de la réglementation acoustique**

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013 est entré en vigueur l'**Arrêté du 27 novembre 2012** issu du **Décret n° 2011-604 du 30 mai 2011** relatif à l'**Attestation de prise en compte de la réglementation acoustique** à établir à l'achèvement des travaux de bâtiments d'habitation neufs. La compétence acoustique est requise à 3 moments clés de la construction d'un logement :

- La conception,
- L'exécution,
- La réception de l'ouvrage (complétée de mesures acoustiques par échantillonnage pour les opérations de plus de dix logements).

Pendant ces 3 moments clés indissociables, la compétence technique et la supervision d'un expert en acoustique sont requis pour justifier d'une attestation acoustique conforme. En clair, si une attestation ne comprend pas ces trois volets, elle est irrégulière.

TYPE DE MESURE	TAILLE DE L'OPÉRATION	NOMBRE MINIMUM DE MESURES suivant la nature de l'opération	
		Individuel	Collectif
Isolement acoustique contre les bruits de l'espace extérieur	de 10 à 30 logements	0 ou 1 (1)	0 ou 1 (1)
	plus de 30 logements	1 à 2 (2)	1 à 2 (2)

**Tableau 2** : Nombre de mesures à réaliser à la réception de l'ouvrage

- (1) Pour les opérations de 10 à 30 logements, si l'exigence est inférieure à 35 dB, aucune mesure d'isolement de façade n'est imposée. Dans le cas contraire, une mesure doit être réalisée.
- (2) Pour les opérations de plus de 30 logements, lorsque l'exigence d'isolement de façade est inférieure à 35 dB, 1 mesure doit être réalisée, si l'exigence est égale ou supérieure à 35 dB, alors 2 mesures sont à réaliser.

**Ce qu'il faut retenir :**

Une vérification de la performance de l'isolement de la façade, par mesure à la réception de l'ouvrage, est requise, réglementairement, pour les opérations individuelles ou collectives de 10 à 30 logements si l'exigence (déterminée via tableau 1) et supérieure à 35 dB.



### 1.3 Exemples de Solutions Acoustiques (ESA) conformes à la réglementation acoustique

Ce guide d'aide à la conception (dernière version datant de janvier 2014) donne des exemples de solutions à titre illustratif ; néanmoins, elles n'ont pas valeur de respect de la réglementation acoustique. L'atteinte effective des résultats reste de la responsabilité des MO, concepteur et entreprises du bâtiment.

Il est défini :

- Des solutions de façade avec objectif d'isolement aux bruits extérieurs de 30dB, 35dB et 38dB,
- Un classement de la qualité acoustique de produits (ou systèmes) appréciée sur une échelle de classes de performance croissante : ESA1 à ESA6.



① Fenêtre ou porte fenêtre ESA 4 avec ou sans coffre de volet roulant

②

- ESA 4 si au plus une entrée d'air par 10 m<sup>2</sup> au sol
- ESA 5 pour plus d'une entrée d'air par 10 m<sup>2</sup> au sol

③ Coffre de volet roulant traversant ESA 4 si non inclus dans le bloc fenêtre

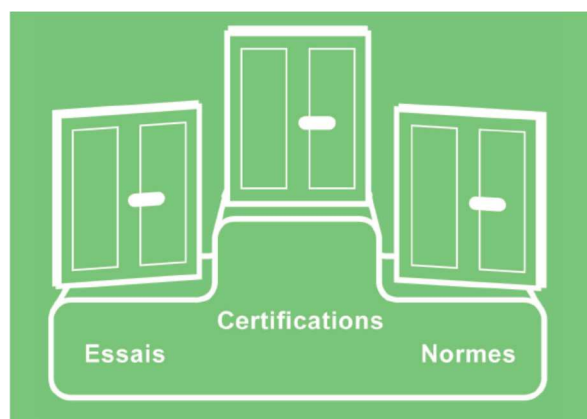
Limites :

- Local : rapport surface fenêtre / surface au sol < 0,2
- Mur de façade isolé par l'intérieur ou l'extérieur : masse surfacique 180 kg/m<sup>2</sup> ou  $R_w + C_v$  équivalent de 40 dB

**Tableau 3** : Exemple de solution de façade pour un objectif de 30 dB

### 1.4 Les classes de performances ESA des fenêtres

#### Comment justifier de la performance acoustique de sa fenêtre ?



#### Trois types de justifications possibles :

- Ouvrages ou composants faisant l'objet **d'une certification** (essais et suivi de qualité),
- Ouvrages ou composants ayant fait l'objet d'un **rapport d'essai de type (ETI) mais sans suivi de qualité**,
- Ouvrages ou composants réalisés selon **les normes de spécifications** et ne faisant l'objet **ni d'une certification ni d'un rapport d'essai**.

Type	Produit caractérisé <b>au choix</b> par		
	Certification ACOTHERM	Essai de type de moins de 10 ans	Description
<b>ESA 4</b>	Classement ACOTHERM AC1	$30 \leq R_w + C_{tr}$	Fenêtre, classement d'étanchéité A*3 (voir Annexe A5) avec menuiserie bois, métal ou PVC avec double vitrage certifié CEKAL, classe AR2
	$28 \leq R_w + C_{tr}$		
<b>ESA 5</b>	Classement ACOTHERM AC2	$35 \leq R_w + C_{tr}$	Fenêtre, classement d'étanchéité A*3 (voir Annexe A5) avec menuiserie bois, métal ou PVC avec double vitrage certifié CEKAL, classe AR4
	$33 \leq R_w + C_{tr}$		
<b>ESA 6</b>	Classement ACOTHERM AC3	$38 \leq R_w + C_{tr}$	Fenêtre, classement d'étanchéité A*3 (voir Annexe A5) avec menuiserie bois, métal ou PVC avec double vitrage certifié CEKAL, classe AR4
	$36 \leq R_w + C_{tr}$		

La notion "Essai de type..." suppose que l'essai a été réalisé par un laboratoire accrédité reconnu par le COFRAC, suivant les normes en vigueur.

**Tableau 4** : Classes ESA pour Bloc Baie, fenêtre et porte-fenêtre sans entrée d'air


#### Ce qu'il faut retenir :

Pour les ESA, les 3 types de justifications prennent en compte les incertitudes liées à la dispersion des performances des produits selon leur mode d'évaluation (produit sous certification, essai de type ou description).

La modélisation par calcul n'est pas identifiée comme mode de preuve des classes ESA.

## 2. Performance acoustique d'une fenêtre

### 2.1 Modes d'évaluation actuel

	Modes d'évaluation de la performance acoustique				
	Certification produit	Essai laboratoire NF EN 10140-1 à 5	Modélisation/ Calcul	Règles génériques	Extension PV d'essai
Fenêtre Sans entrée air 	Certification NF-ACOTHERM Performance acoustique par essai et/ou règle d'extension	Evaluation de type initiale (marquage CE) <b>MAJORITE DES CAS</b>	<b>Très peu utilisé et en général non recevable</b>	Valeur tabulée Annexe B de NF EN 14351-1+A1 pour fenêtre simple à vitrage isolant Et limitée à $R_{A,tr} \leq 34dB$	Annexe B.4 Selon NF EN 14351-1+A1

### 2.2 Valeur tabulée

Selon Annexe B de la EN 14351-1+A1 de mars 2010 :

Composition vitrage	R <sub>w</sub> +C <sub>tr</sub> selon tableau 4 de EN 12758	Tableau B.2 — R <sub>w</sub> + C <sub>tr</sub> d'une fenêtre à partir du R <sub>w</sub> + C <sub>tr</sub> du vitrage Isolant				
		R <sub>w</sub> + C <sub>tr</sub> <sup>a)</sup> du vitrage Isolant [dB]	Fenêtres simples <sup>b)</sup>		Fenêtres coulissantes, simples <sup>c)</sup>	
			Fenêtre R <sub>w</sub> + C <sub>tr</sub> [dB]	Nombre de garnitures d'étanchéité exigé <sup>d)</sup>	Fenêtre R <sub>w</sub> + C <sub>tr</sub> [dB]	Nombre de garnitures d'étanchéité exigé <sup>d)</sup>
4 / xx / 4	25	24	26	1	24	1
6 / xx / 4	28	25	27	1	25	1
6 / xx / 6	27	26	28	1	26	1
8 / xx / 4	29	27	29	1	26	1
8 / xx / 6	29	28	30	1	27	1
10 / xx / 4	30	30	31	1	27	1
10 / xx / 6	32	32	32	2	28	1
6 / xx / 6 feuilleté	28	34	33	2	N/A	N/A
6 / xx / 10 feuilleté	32	36	34	2	N/A	N/A

a) Essayé selon EN ISO 140-3 (méthode de référence) ou valeur générique selon EN 12758 ou EN 12354-3.  
 b) Fenêtres simples, fixes et ouvrantes (à projection, à l'italienne, à la française, à soufflet) — avec une classe de perméabilité à l'air de 3, voir 4.14.  
 c) Fenêtres simples coulissantes de classe de perméabilité à l'air de 2, voir 4.14.  
 d) Seulement fenêtres ouvrantes.

Uniquement par l'utilisation de valeurs tabulées (vitrage puis fenêtre), une fenêtre peut justifier d'un affaiblissement de 32dB maximum avec un vitrage de 10/xxx/6. Actuellement en cours de révision.

### 2.3 Extension des résultats

Selon Annexe B de la EN 14351-1+A1 de mars 2010 :

Tableau B.3 — Règles d'extrapolation pour différentes dimensions d'une fenêtre

Dimensions des fenêtres		Valeur de l'isolation acoustique de la fenêtre
Résultats de l'essai (voir B.2) du corps d'épreuve de dimension quelconque	Valeurs tabulées (voir B.3) <sup>a)</sup>	
- 100 % à + 50 % de la surface totale du corps d'épreuve	Surface totale ≤ 2,7 m <sup>2</sup>	$R_w$ et $R_w + C_{tr}$ selon B.2 ou B.3
+ 50 % à + 100 % de la surface totale du corps d'épreuve	2,7 m <sup>2</sup> < Surface totale ≤ 3,6 m <sup>2</sup>	$R_w$ et $R_w + C_{tr}$ corrigé par - 1 dB
+ 100 % à + 150 % de la surface totale du corps d'épreuve	3,6 m <sup>2</sup> < Surface totale ≤ 4,6 m <sup>2</sup>	$R_w$ et $R_w + C_{tr}$ corrigé par - 2 dB
> + 150 % de la surface totale du corps d'épreuve	4,6 m <sup>2</sup> < Surface totale	$R_w$ et $R_w + C_{tr}$ corrigé par - 3 dB

a) Les intervalles indiqués pour les valeurs tabulées sont identiques à ceux indiqués pour les valeurs tabulées selon B.2 en utilisant la dimension recommandée du corps d'épreuve de 1,23 m × 1,48 m.

### 2.4 Projet de valeur par interpolation

Projet en cours : Annexe B5 de la prEN 14351-1 :2015.

A partir de 2 mesures d'essais selon EN 10140-2 sur 2 menuiseries techniquement équivalentes avec 2 compositions de vitrage différentes.

Note : Texte du projet actuel : These original tests shall be performed on window specimens, which except for the IGU are technically equivalent and installed in the same way for.

#### Exemple :

For a given window design with two different IGUs two test results exist, that deliver the following values:

Table B.5 original data from test reports (example)

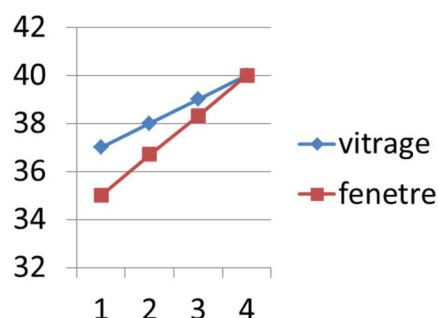
	IGU			Window		
	$R_w$ ( $C; C_{tr}$ ) dB	Step 1: $R_w$ dB	Step 2: $R_w + C_{tr}$ dB	$R_w$ ( $C; C_{tr}$ ) dB	Step 1: $R_w$ dB	Step 2: $R_w + C_{tr}$ dB
Test result 1	41 (-2;-4)	41	37	39 (0;-4)	39	35
Test result 2	48 (-2;-8)	48	40	44 (-1;-4)	44	40

Calcul du facteur d'interpolation :

$$40 - 37 = 3$$

$$40 - 35 = 5$$

**Facteur interpolation  $R_w + C_{tr} = 5/3$**



Résultat de l'interpolation :

Table B.7 Interpolation of  $R_w+C_{tr}$  in the example

Row no.	Tested result	IGU's $R_w+C_{tr}$	window, $R_w+C_{tr}$ , interpolated	window, $R_w+C_{tr}$ , rounded down
1	x	37	35	35
2		38	36,7	36
3		39	38,3	38
4	x	40	40	40

**Ce qu'il faut retenir :**

La performance acoustique d'une fenêtre est très majoritairement mesurée par voie expérimentale car les méthodes normatives de valeur tabulée et règles d'extension sont limitées et trop pénalisantes par rapport au besoin du marché.

Le projet de calcul par interpolation entre 2 valeurs mesurées par essai (pour le vitrage le moins et le plus performant de la gamme) s'il est maintenu dans la version finale de la norme permettra d'obtenir à moindre cout les performances acoustiques d'une fenêtre pour l'ensemble des vitrages envisagés. Le pré requis à l'utilisation de cette méthode par le menuisier sera l'obtention des performances acoustiques des vitrages mesurés par essai selon EN 10140-2 auprès de son fournisseur de vitrage.

### 3. Comportement acoustique d'une fenêtre

#### 3.1 Les facteurs influents

Une fenêtre est l'assemblage de différents composants.

Facteurs influents sur le comportement acoustique de la fenêtre	Nature du mode d'influence	Estimation du Niveau d'influence de 0 (faible) à 5 (très influent)
Surface de la fenêtre	Effet de plaque	3
Nature du vitrage isolant (composition, scellement)	Effet masse – ressort – masse du vitrage isolant Fréquence critique des verres et de résonance du vitrage isolant	5
Surface et taux de(s) remplissages /fenêtre	Effet de plaque Prépondérance de la performance de(s) remplissage(s) vis-à-vis des autres facteurs	5
Niveau de Perméabilité à l'air de la liaison ouvrant dormant	Propagation du son par les passages d'air Modélisation du débit de fuite par une fente Possibilité de « ponts acoustiques »	4 En HF et pour des vitrages performants
Géométrie de la liaison ouvrant dormant (frappe, coulissant, gueule de loup, jeu de 4 ou 12)	Effet en fonction de la géométrie de la chicane modélisation du débit de fuite par une fente unique	2
Profilé d'étanchéité liaison ouvrant & dormant (nature et nombre)	Effet masse et raideur	1 En HF et pour des vitrages performants
Nature du remplissage opaque (composition,..)	Effet masse – ressort – masse du remplissage Fréquence critique et/ou résonance du remplissage	5 « Corrélée à la surface »
Nature du châssis : Essence de bois, épaisseur	Effet masse et raideur Fréquence critique du bois	2 voire 3 quand le vitrage est performant
Nature du seuil (matériaux, hauteur,...)	Effet masse et raideur	1
liaison vitrage & châssis (nature du calfeutrement et de la feuillure à verre, ...)	Effet ressort Raideur entre vitrage et châssis	1
Mode d'assemblage du châssis (collé, vissé collé, mécanique...)	Raideur	0

#### Ce qu'il faut retenir :

La performance acoustique d'une fenêtre est impactée par une multitude de paramètres provenant de la nature et de l'association des différents composants de la fenêtre.

La fenêtre étant constituée majoritairement d'une partie vitrée, elle a un comportement acoustique proche d'un système de type double paroi « MASSE – RESSORT – MASSE ».

La performance acoustique de certains des composants principaux tels que le vitrage et d'éventuels remplissages opaques (soubassement) peut être mesurée par essai individuellement.

### 3.2 Système Masse – Ressort - Masse

Un système Masse – Ressort – Masse pour une menuiserie se caractérise par la présence de 2 phénomènes physiques :

- Le 1<sup>er</sup> en basse fréquence : fréquence de résonance  $f_0$

Plage de fréquences  $f_0$  (pour les doubles vitrages) : entre 160 et 200Hz.

Sur le plan du comportement vibro-acoustique, un double vitrage peut être assimilé à un système masse-ressort-masse. A la fréquence de résonance  $f_0$  de ce système, les deux masses vibrent en opposition de phase avec une grande amplitude. Plus le double vitrage est léger, plus l'influence de la fréquence de résonance sur l'effet d'affaiblissement augmente.

$$f_0 = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$

$f_0$  est la fréquence de résonance du système masse-ressort-masse,  $d$  est la distance entre les deux parements,  $m_1$  et  $m_2$  les masses surfaciques des deux verres.

- Le 2<sup>nd</sup> en haute fréquence : fréquence(s) critique(s)  $F_c$

Un « puit » au niveau de chacune des fréquences critiques des verres.

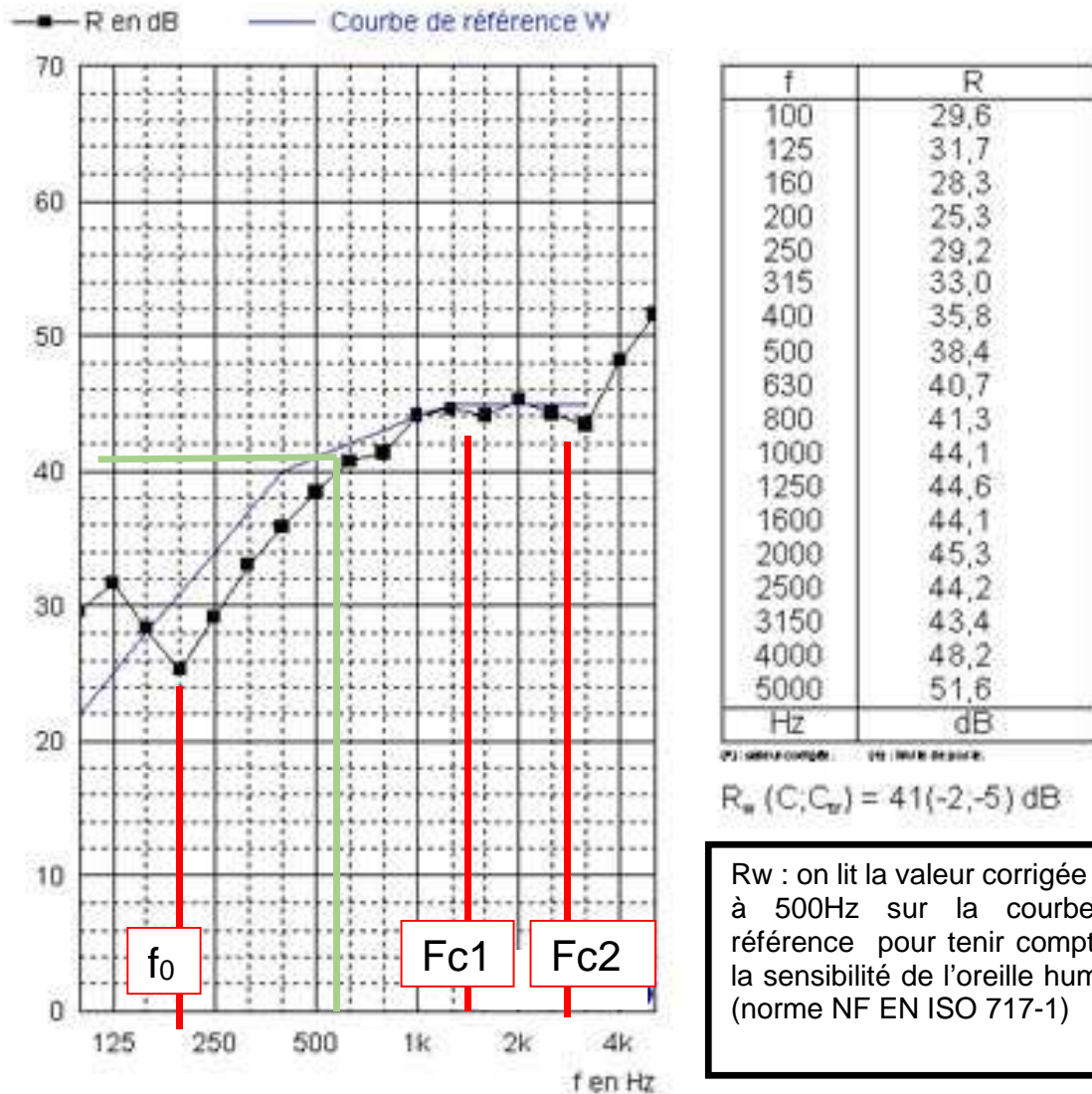
Impacté directement par les épaisseurs des verres (raideur et masse)

Plage de fréquence de  $F_c$  : entre 1000 et 3150 Hz (épaisseur de 4 à 12 mm de verre).

Calcul de  $F_c$  possible ( $F_{c1}$  pour verre 1 et  $F_{c2}$  pour verre 2).

Pour un vitrage symétrique, on observe un seul puit à la fréquence critique.

Pour un vitrage asymétrique, on observe un puit moins « profond » à chacune des fréquences critiques des verres. On peut donc observer la « dilution » de l'effet de la fréquence critique, la rendant moins impactante sur la courbe et le résultat final de l'indice acoustique.



**Tableau 5** : Courbe d'isolation acoustique caractéristique d'une fenêtre sans entrée d'air

**Ce qu'il faut retenir :**

Les fréquences de résonance et critique sont en général calculables à partir des propriétés (si elles sont connues et parfaitement maîtrisées) des matériaux de remplissages vitrés et opaques.

### 3.3 Les systèmes multicouches

#### 3.3.1 Vitrage isolant

##### 3.3.1.1 Le marquage CE

L'isolation vis-à-vis du son aérien direct  $R_w(C; C_{tr})$  déterminée selon EN 12758 est une des caractéristiques mandatées du marquage CE des vitrages isolants selon NF EN 1279-5+A2.

Système d'évaluation de niveau 3 si le vitrage isolant est à usage relatif à l'économie d'énergie et/ou l'affaiblissement acoustique.

2 possibilités pour le fabricant de vitrage isolant :

- Soit affichage de « npd » correspondant à performance non déterminée,
- Soit évaluation du  $R_w(C; C_{tr})$  par un organisme notifié.



La norme NF EN 12 758 permet la détermination du  $R_w(C ; C_{tr})$  via :

- Essai selon NF EN 10 140-2 et expression selon NF EN 717-1,
- Valeurs tabulées par composition verrier (tableau 4 de NF EN 12 758),
- Règles d'extension.

### 3.3.1.2 La Certification CEKAL

CEKAL définit 6 classes de vitrages (AR1 à AR6) suivant les performances minimales obtenues vis à vis d'un bruit routier (indice d'affaiblissement acoustique  $R_{A,tr}$ ).

Classes de performances acoustiques renforcées par ordre croissant :

Classe	AR1	AR2	AR3	AR4	AR5	AR6
$R_{A, tr}$	≥ 25dB	≥ 28dB	≥ 30dB	≥ 33dB	≥ 35dB	≥ 37dB

Ainsi, un vitrage AR2 permet un abaissement du niveau sonore des bruits extérieurs de l'ordre de 28 dB à 29 dB.

Trois possibilités sont offertes pour classer la performance acoustique d'un vitrage :

- Règles génériques,
- Composition spécifique classée,
- Essai au cas par cas.

#### Quelles sont les règles génériques ?

Il s'agit de règles définies à partir des résultats des campagnes d'essais menées par CEKAL. Ces règles permettent de classer un vitrage isolant à partir des critères suivants : somme des épaisseurs des composants verriers, différence d'épaisseur entre les composants verriers.

#### Qu'est-ce qu'une composition spécifique classée ?

Il s'agit d'une composition non générique ayant fait l'objet d'une campagne d'essais menée par CEKAL avec plusieurs laboratoires et centres de production, ce qui a permis de définir son classement.

## Quand recourir aux essais en laboratoire ?

Dans certains cas, les règles génériques et les compositions spécifiques disponibles ne répondent pas aux attentes. La performance acoustique d'une composition peut alors être certifiée sur la base d'essais réalisés par le centre de production concerné.

La valeur retenue est :

- Soit la valeur moyenne moins 2 dB sur 3 échantillons dans 1 laboratoire,
- Soit la valeur minimale sur 6 échantillons dans 2 laboratoires.

		Règles de classement	
Classe AR	$R_{A, tr}$	Double vitrage	Triple Vitrage
AR1	$\geq 25\text{dB}$	lame d'air 6 à 16 mm somme des épaisseurs des composants verriers $\geq 8$ mm	lames de gaz argon 12 à 16 mm et compositions (épaisseurs des composants verriers) : 4-4-4 , 4-5-4"
AR2	$\geq 28\text{dB}$	lame d'air 6 à 16 mm somme des épaisseurs des composants verriers $\geq 10$ mm et différence d'épaisseur des composants $\geq 2$ mm	lames de gaz argon 12 à 16 mm et compositions (épaisseurs des composants verriers) : 5-4-4 , 6-4-4 , 33.2-4-4 , 8-4-4 , 44.2-4-4"
AR3	$\geq 30\text{dB}$	lame d'air 6 à 16 mm Somme des épaisseurs des composants verriers $\geq 14$ mm et différence d'épaisseur des composants $\geq 4$ mm	pas de compositions génériques certification des performances acoustiques après mesures en laboratoire
AR4	$\geq 33\text{dB}$	lame d'air 6 à 16 mm somme des épaisseurs des composants verriers $\geq 18$ mm et différence d'épaisseur des composants $\geq 2$ mm	
AR5	$\geq 35\text{dB}$	pas de compositions génériques certification des performances acoustiques après mesures en laboratoire	
AR6	$\geq 37\text{dB}$		

**Tableau 6** : Règles de classement acoustique des vitrages isolants CEKAL

Sur le marché, Il existe différentes méthodes d'estimation des performances acoustiques de vitrage isolant développées notamment par des bureaux d'études acoustiques et fabricants de vitrages mais aucune méthode de modélisation n'est à ce jour normalisée.

Les indices d'affaiblissement acoustique sont estimés et simulent majoritairement la performance d'un vitrage de 1.23 x 1.48 m selon EN ISO 10140-3. La précision annoncée des indices n'est pas meilleure que +/- 2dB. Ce mode de preuve est donné exclusivement à titre indicatif.

### Ce qu'il faut retenir :

La performance acoustique des vitrages isolants, reconnue par le marché, est déterminée par essai ou règles génériques provenant de campagnes d'essais.

Les fabricants de vitrage sont en mesure de fournir les courbes d'isolation acoustique de leur composition de vitrage isolant.

Aucune méthode de modélisation n'est à ce jour normalisée.

### 3.3.2 Les remplissages opaques

Les remplissages opaques de fenêtres sont majoritairement des panneaux multicouches de différents matériaux dont les performances acoustiques sont évaluées par leurs normes de références respectives.

Les indices d'affaiblissement acoustique peuvent être simulés selon la méthode TMM (Transfer Matrix Method). Comme expliqué au §3.3.1, la modélisation actuelle est peu fiable en basse fréquence et impacte donc sur la précision de l'indice global estimé à +/- 3dB.

#### Ce qu'il faut retenir :

La performance acoustique des remplissages opaques multicouches peut être calculée mais avec une précision d'indice compatible avec de la R&D, peu compatible avec des justifications sous accréditation pour les besoins du marché.

### 3.4 Fuite acoustique liée à la perméabilité à l'air de la fenêtre

Lors de la mesure acoustique de la fenêtre en laboratoire, on peut estimer que la fuite acoustique au niveau de la liaison ouvrant / dormant est la somme de :

- La fuite acoustique via transmission aérienne (via passage d'air entre O/D)
- La fuite acoustique via transmission solidienne au travers des matériaux. L'annexe J de la norme ISO 10140-1/A1 :2012 détermine les lignes directrices pour la détermination de l'indice de réduction acoustique des joints d'étanchéité  $R_s$  par mètre de calfeutrement ou de joint, en décibels et en fonction de la fréquence.

La performance de l'isolation acoustique est fortement influencée par la perméabilité à l'air, même pour de petites variations : on estime une perte de 4 à 6 dB sur le  $R_w$  si la perméabilité à l'air de la fenêtre est dégradée de  $A^4$  à  $A^3$ .

#### 3.4.1 Mesure et modélisation de la perméabilité à l'air de la fenêtre

Les fenêtres bois ont majoritairement une classe de perméabilité  $A^4$  (selon NF 12 207) mesurée après essai selon NF EN 1026 : équivalent à un débit de fuite inférieur ou égal à  $3 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$  de surface totale sous 100Pa de pression différentielle entre les 2 parements.

Les déperditions d'air sont fonction du jeu, du linéaire de liaison et de sa loi de fuite.

La loi de fuite d'air pour un orifice, pour une pression donnée, par mètre linéaire de joint est de la forme :

$$Ql = k \times \Delta P^n$$

avec :

$\Delta P$  : pression différentielle entre les deux faces du joint/de l'orifice, en Pa

$k$  : coefficient lié à la géométrie du joint / de l'orifice (essentiellement le jeu)

$n$  : exposant de la loi de fuite (proche de 2/3 pour les orifices en forme de fentes)

$Ql$  : débit linéique, en  $\text{m}^3/(\text{h.ml})$

#### 3.4.2 Lien entre fuite acoustique et perméabilité à l'air de la fenêtre

L'intensité et la géométrie de l'orifice de la fuite à l'air (passage d'air à 0Pa) ont un impact sur le niveau de déperdition acoustique au travers de la liaison ouvrant / dormant.

Différentes typologies de liaison ouvrant / dormant en fenêtre bois :

- Barrière intermédiaire & recouvrement intérieur - à frappe en jeu de 12 mm,
- Barrière intermédiaire à lèvre en jeu de 4 mm,

- Barrière recouvrement intérieur en frappe jeu de 12 mm,
- Barrière intermédiaire par écrasement/recouvrement intérieur en jeu de 4 (battement mouton gueule de loup).

L'intensité et la géométrie de l'orifice de la fuite à l'air dépend :

- Du nombre/ positionnement de(s) joint(s) sur ouvrant et/ou dormant,
- Des réglages des ferrures châssis ouvrants et dormant,
- La nature (géométrie, matériau, à frappe ou à lèvre...) du joint d'étanchéité,
- De la géométrie de chicanes formées par les profilés bois de la liaison O/D.
- De la pression à laquelle est mesurée la fuite

Autant de paramètres qui complexifient la compréhension et la modélisation de la fuite acoustique liée « au passage d'air » dans la liaison ouvrant dormant.

### 3.4.3 Principe de modélisation d'une fuite acoustique liée à fuite à l'air

La modélisation d'une fuite acoustique est possible de façon déterministe, en posant les équations du coefficient de pertes par transmission.

Une fuite acoustique est due à la présence d'une petite ouverture entre deux cavités. Suivant le rapport des dimensions caractéristiques de la fuite par rapport à la cavité plusieurs modélisations de ce chemin de transmission sont possibles.

On peut prendre en compte les deux cas suivants : fuite entre deux cavités et fuite entre un bruit incident (milieu acoustique infini) et une cavité. La fuite peut également avoir une certaine épaisseur. La fuite est donc déterminée par sa profondeur, et la forme de sa surface qui sera définie comme une fente, un rectangle ou un cercle. Dans le cas d'une menuiserie, la fuite due à l'étanchéité des joints est calculée comme une fente (c'est-à-dire une épaisseur de fissure et une longueur). Par exemple le mètre linéaire de joints et une fissure en dixième de millimètres.

#### 3.4.3.1 Etude PERMEACOB : Perméabilité à l'air, mesure et modélisation

Dans le cadre d'une étude terminée en 2016 : PermeaCOB, FCBA est revenu sur l'évaluation des fuites pour les menuiseries et plus largement pour les enveloppes de construction en bois. Cette étude a constitué l'occasion de coupler des mesures de perméabilité à l'air avec des mesures acoustiques, puis, de modéliser les fuites à partir de la mesure de perméabilité.



**Tableau 7: Montage d'une menuiserie dans un mur à ossature bois en cellule acoustique**

Sur une paroi à ossature bois comprenant une menuiserie de 1m<sup>2</sup>, nous avons mesuré l'indice d'affaiblissement acoustique de 4 configurations.

- Permea1: Mur à ossature bois avec une menuiserie,

- Permea2: Mur à ossature bois avec une menuiserie ayant une compression de joint maximum,
- Permea3: Mur à ossature bois avec une menuiserie ayant une compression de joint maximum + joint de scellement pérénator autour de l'ouvrant,
- Permea4: Permea2 + un trou de 63 mm dans le plâtre pour la mise en place d'un bloc de prise électrique.

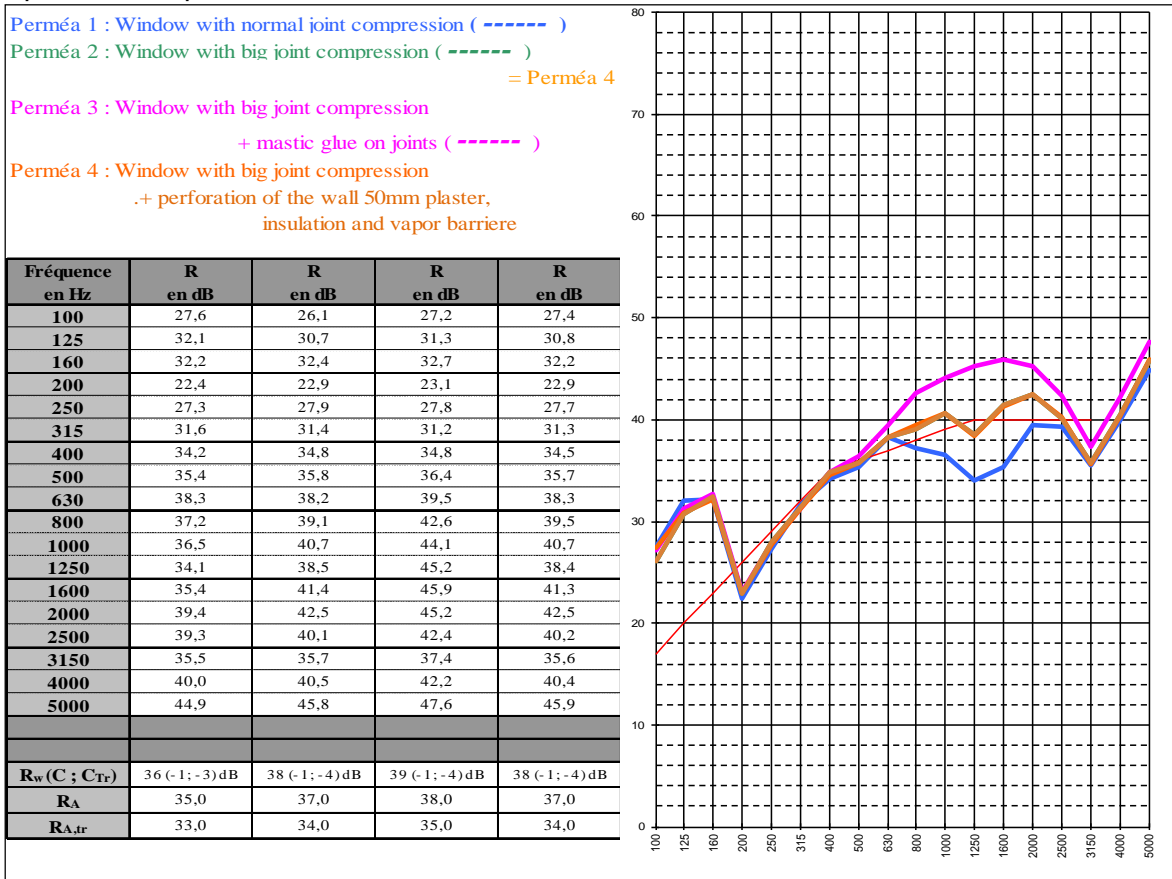


Tableau 8 : Sound transmission loss of the 4 samples.

Nous avons utilisé le logiciel SEA-Wood pour modéliser le mur avec la menuiserie. SEA-Wood a permis d'identifier l'influence des fuites. Pour cela nous avons introduit l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi la plus étanche à l'air, c'est-à-dire la mesure Permea3. Cette valeur a été établie comme étant la référence.

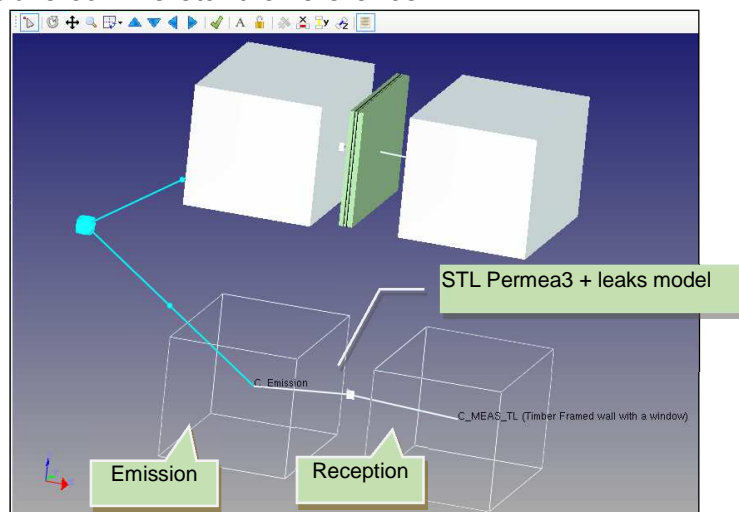
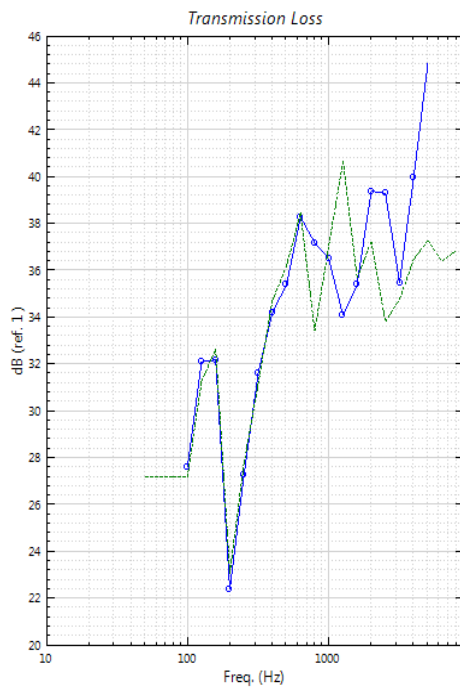


Figure 9: Model SEA-Wood pour calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique mur + menuiserie + fuites

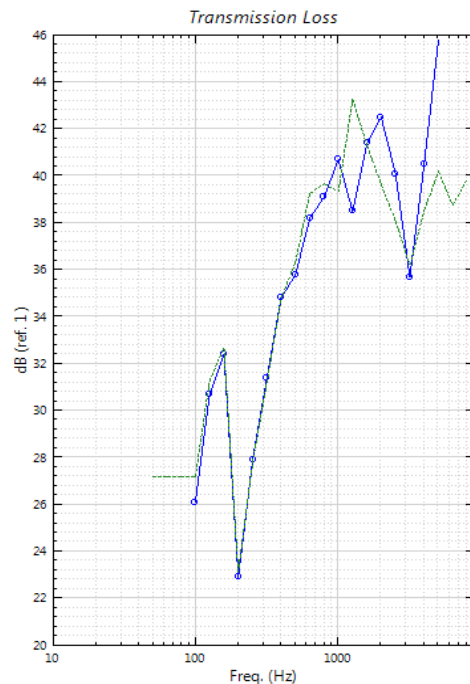
Les mesures Permea1 et Permea2 correspondent à Permea3 avec respectivement les perméabilités à l'air associées à des fuites acoustiques. Pour prédire Permea1 et Permea2 nous avons ajouté à Permea3 des fuites acoustiques à l'aide du logiciel SEA-Wood :

Sur la **Figure 1010**, nous présentons l'indice d'affaiblissement acoustique mesuré de Permea1 (mur + joint normaux) avec à l'indice d'affaiblissement acoustique calculé à partir de Permea3 + Sor = 0,36 cm<sup>2</sup>,

Sur la **Figure 1111**, nous présentons l'indice d'affaiblissement acoustique mesuré de Permea2 (mur + joint comprimés au maximum) avec à l'indice d'affaiblissement acoustique calculé à partir de Permea3 + Sor = 0,25 cm<sup>2</sup>.



**Figure 10:** Indice d'affaiblissement acoustique mesuré de Permea1 (mur + joint normaux). Mesuré (Ligne bleue). Calculé (ligne verte) avec Sor = 0,36 cm<sup>2</sup>.



**Figure 11:** Indice d'affaiblissement acoustique mesuré de Permea2 (mur + joint comprimés). Mesuré (Ligne bleue). Calculé (ligne verte) avec Sor = 0,25 cm<sup>2</sup>.

### 3.4.4 Modélisation de la performance acoustique de la liaison ouvrant dormant

#### Ce qu'il faut retenir :

Lors de la mesure acoustique de la fenêtre en laboratoire, la fuite acoustique au niveau de la liaison ouvrant dormant est la somme de :

- La fuite acoustique via transmission aérienne (via passage d'air entre O/D)
- La fuite acoustique via transmission solidienne au travers des matériaux

Les deux sont modélisables mais il convient de bien les dissocier lors du calage des modèles car comparer un résultat d'essai avec un résultat de calcul sans connaître le niveau de passage d'air A\* de la fenêtre testée lors de l'essai risque de fausser grandement la confrontation et le calage du modèle de la transmission solidienne.

La modélisation du calcul acoustique de la liaison ouvrant / dormant doit d'abord se baser sur une hypothèse de perméabilité à l'air de la fenêtre maîtrisée et vérifiée à un niveau A\*4 (c'est le cas actuellement via les marques de qualité de fenêtre). Un module de dégradation de la performance acoustique en fonction de la dégradation du niveau de perméabilité à l'air pourrait ensuite être étudié.

L'obtention d'une banque de donnée de  $R_s$  (performance acoustique des profilés d'étanchéité) avec les différentes chicane de fenêtres bois est nécessaire pour alimenter par la suite les modèles de calculs et les possibilités d'extension de PV d'essai.

## 4. Méthodes de modélisation par calcul

Chacune des méthodes permet de réaliser des calculs pouvant atteindre une précision adaptée dans un domaine spécifique.

méthode	Domaine fréquentiel	Temps de calcul	Qualité Précisions
<b>Empirique (loi de masse, ...)</b>		Très court	--
<b>Analytique - TMM</b>	MF et HF	Court	+
<b>Numérique – FEM</b>	BF	Très long	++
<b>Energétique - SEA</b>	MF et HF	Court	+ et ++ en HF

**Tableau 12** : comparaison des méthodes de modélisation par calcul

### 4.1 Méthode analytique TMM (Transfer Matrix Method)

La méthode de matrice de transfert (TMM) est utilisée classiquement pour prédire des propriétés acoustiques des couches homogènes parallèles latéralement infinies assemblées en série pour former un empilement. Chaque couche est exprimée par une matrice reliant la pression et la vitesse de part et d'autre de celle-ci. En faisant la continuité de la pression et de la vitesse entre chaque couche, une matrice globale peut être déduite. Pour finir, à partir de cette matrice, les indicateurs acoustiques (coefficient d'absorption et perte par transmission) peuvent être calculés.

#### Limites de cette méthode :

Modélisation de plaques infinies alors qu'en basses fréquences, le comportement des couches est principalement modal et dépend notamment des dimensions du multicouche (longueur x largeur). La modélisation n'est donc pas fiable en basses fréquences et le calcul de l'indice global  $R_{A,tr}$  dépend fortement des performances en basses fréquences.

Possibilité de filtrage spatial pour approcher artificiellement les valeurs BF.

Les données d'entrée sont parfois difficilement accessibles et nécessitent d'autres mesures en laboratoire (raideur ou module d'Young dynamique, amortissement, ...).

En l'état, la méthode analytique serait plutôt adaptée à la comparaison qu'au prédictif et reste le meilleur compromis pour modéliser un système multicouche.

### 4.2 Méthode de FEM (Finit Element Method)

La méthode la plus utilisée pour le calcul acoustique est la modélisation aux éléments finis. Elle est couramment utilisée pour le calcul de structures soumises à des chargements vibratoires. Le principe est de décomposer le milieu en un nombre fini d'éléments. Chacun de ces éléments de masse  $m$  est relié à ceux qui l'entoure par un ressort. Le comportement non linéaire peut être décrit, dans certains cas, en ajoutant des termes d'amortissements. On peut écrire une équation pour chaque élément. La difficulté est dans le choix de l'échelle de solution. Traditionnellement les acousticiens utilisent 4 à 6 éléments par longueur d'onde conduisant à un encombrement informatique rapidement limitant.

La FEM est lourde pour les calculs de conception des constructions courantes vis-à-vis de l'isolation acoustique. Par conséquent, elle est réduite à l'étude de cas simples ou simplifiés en basse fréquence.



Tous les codes de calculs FEM doivent subir une adaptation pour être utilisés dans le domaine de l'acoustique. L'outil FEM dédié au calcul acoustique n'est donc pas disponible immédiatement, il est d'utilisation contraignante et a un domaine d'application limité. Pour nourrir les modèles, il faut introduire un grand nombre de caractéristiques qui ne sont pas facilement disponibles. De plus, les modèles sont très sensibles aux conditions aux limites et aux incertitudes introduites.

### 4.3 Méthode énergétique SEA (Statistical Energy Analysis)

La SEA est une méthode d'analyse des transferts d'énergie entre systèmes couplés. Elle a été développée, à l'origine, en vue de l'application aux industries aéronautique et aérospatiale et à la construction navale, Ces structures sont en effet difficilement accessibles aux méthodes traditionnelles d'analyse vibratoire (décomposition modale), en raison principalement du très grand nombre de modes présents dans les bandes de fréquences MF et HF.

La SEA s'avère être une théorie séduisante car elle s'applique facilement. En effet, ses développements ne nécessitent pas de moyens numériques très élaborés. La modélisation consiste en une double discrétisation : spatiale (découpage de la structure en sous-systèmes) et fréquentielle (décomposition du spectre par bande d'octave ou par bande de tiers d'octave). La discrétisation permet l'analyse des flux énergétiques échangés dans la sous-structuration. Les paramètres qui gouvernent la transmission acoustique entre sous-systèmes sont alors les facteurs de perte et de couplage et peuvent être identifiés expérimentalement par inversion du problème (SEA Inverse). Cette particularité fait de la SEA un moyen très efficace pour la conception dans le domaine de l'acoustique et de la vibration des constructions.

Au lieu de se focaliser sur les détails d'un mode particulier (comme dans l'analyse modale), la SEA considère la moyenne d'un nombre important de modes acoustiques et structuraux. La théorie repose sur le principe de la conservation de l'énergie vibratoire. On transforme un problème de couplage vibratoire complexe en un couplage énergétique simple. La variable d'état est l'énergie. La résolution d'un problème acoustique débouche sur la conversion de l'énergie en niveau de pression  $L_P$  ou en niveau vibratoire  $L_V$ .

## 5. L'étude R&D ACOU-BAIE

Le rapport final de décembre 2004 du projet ACOU-BAIE, réalisé par le CTBA, délivre les résultats de la première étude R&D portant sur la création d'un modèle de conception pour l'optimisation acoustique des menuiseries en bois. Les conclusions de cette étude indiquent que la modélisation acoustique élaborée est concluante sur un exemple de bloc-baie : menuiserie équipée d'un vitrage feuilleté, d'un coffre à volet roulant et d'une entrée d'air.

Le projet a été conçu en trois phases, une première phase pour tester la modélisation d'une menuiserie avec les outils existants. Puis, une seconde et troisième phases plus détaillées, où il a été nécessaire de faire évoluer les outils de calculs et à procéder à des mesures spéciales.

L'étude R&D ACOU-BAIE a permis de d'avancer sur la réalisation d'un modèle de prédiction de la performance acoustique par le calcul.

### 5.1 Phase 1 de l'étude : premier schéma de modèle

Le travail est basé sur la confrontation entre essais et calculs ajustés. Les valeurs obtenues par essai ont aidé au « calage » du modèle de calcul pour obtenir un modèle ajusté.

2 outils de modélisation acoustique (logiciel AcouStiff® et AutoSEA®) ont servi au début du projet à modéliser le comportement acoustique de vitrage et de menuiserie.

Le logiciel AutoSEA utilise la méthode SEA, il permet de modéliser de manière phénoménologique la transmission acoustique dans une baie vitrée. Les phénomènes de transmission sont décrits dans l'analyse SEA d'une manière énergétique et la transmission acoustique est divisée en chemins élémentaires de transmission, chaque chemin étant modélisé d'une façon simplifiée.

On montre avec ce modèle que le rayonnement indirect des vitres (qui se traduit par un chemin de transmission apparent direct des salles d'émission et de réception) est prépondérant entre 500 et 4000 Hz. La puissance mécanique échangée à travers ce chemin par les deux salles n'est, par ailleurs, pas prédictible dans cette bande. C'est pour cela que les prévisions de transmission acoustique en configuration de double-vitrage ne peuvent pas être effectuées par une méthode SEA analytique, Il est nécessaire d'avoir recours à une méthode de couplage théorique prenant en compte l'aspect fortement couplé des deux vitres à travers la cavité intermédiaire.

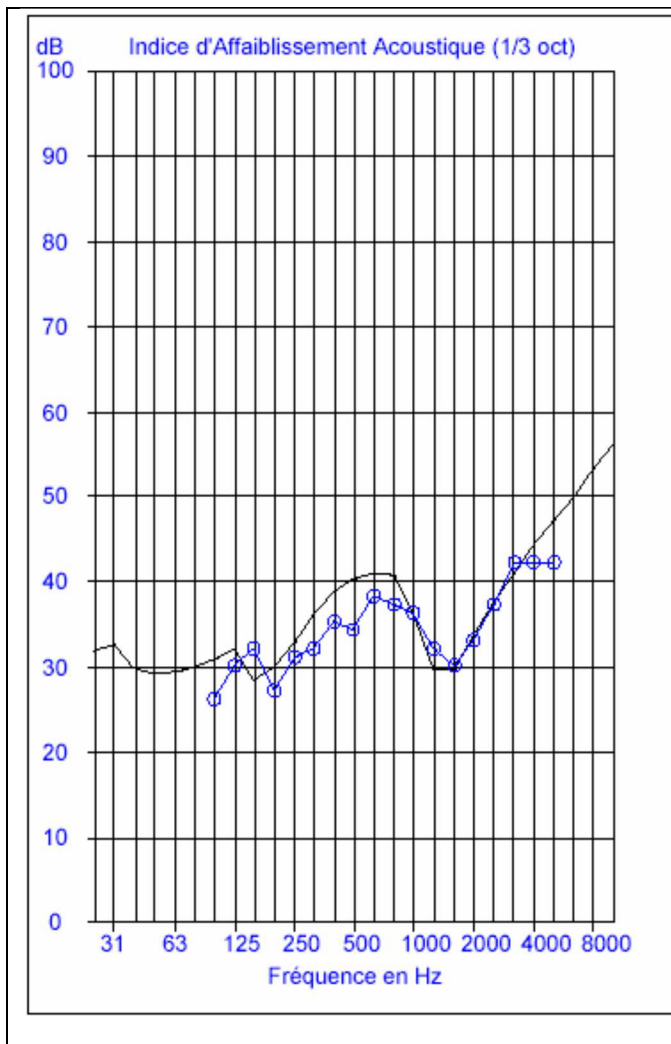
D'un autre côté, l'outil Acoustiff® donne des résultats satisfaisants moyennant l'ajustement empirique d'un coefficient. Cet ajustement peut être discutable car il semble ne pas reposer sur un formalisme physique identifiable.

Observation : La liaison ouvrant / dormant des fenêtres testées a été réglée au mieux selon les préconisations du fabricant cependant le niveau de perméabilité à l'air des menuiseries n'a pas été vérifié sur le caisson d'essai acoustique.

### Evaluation de la qualité du calcul ajusté : niveau A++ A+ A et A-

Nous avons choisi de donner une note pour évaluer les calculs réalisés selon 4 niveaux, allant de A++/A+/A/A-, avec A++ étant la meilleure note. Cette modulation se fait par :

- La reproduction de la phénoménologie sur la courbe d'indice d'affaiblissement acoustique, pente et résonnances,
- La mesure encadre le calcul,
- L'écart maximum minimisé,
- La somme des écarts par 1/3 d'octave minimisé,
- Valeur globale  $R_w$  proche de la mesure à 1dB, 3 dB, ou, 3 à 5 dB.



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 1

#### Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai

-o- : Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx bois avec un vitrage 8/14/10.

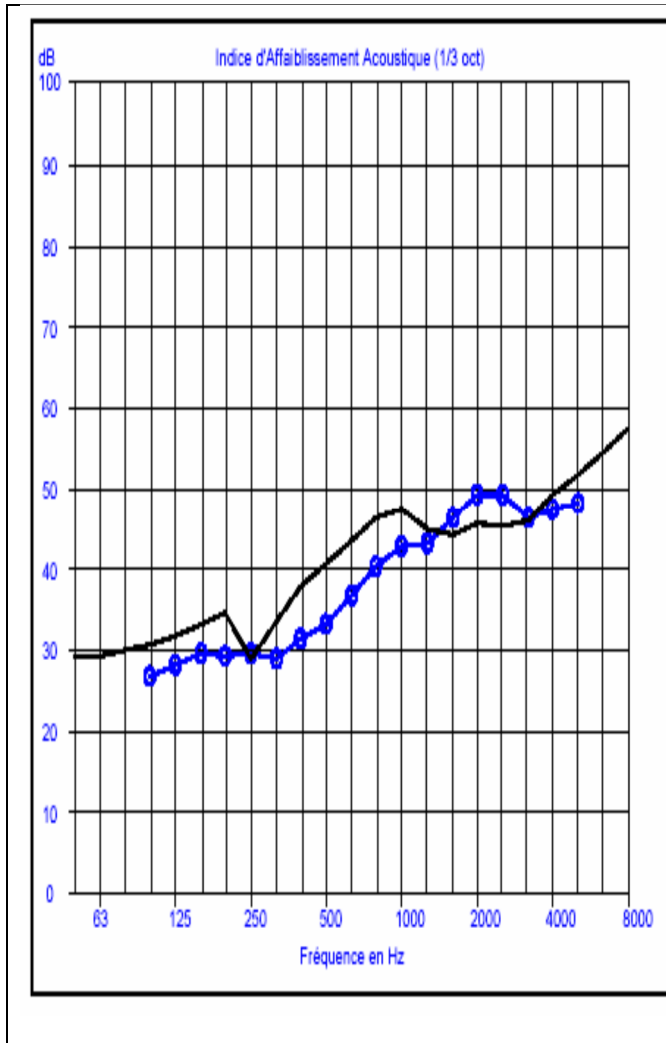
\_\_\_ : Modèle de Calcul AcouStiff ajusté après calage avec les valeurs obtenues par essai,

Calcul sur Acoustiff : Prise en compte du vitrage dissymétrique et de la liaison périphérique rigide 2,7 m

#### Evaluation de la qualité du calcul :

Modélisation A+  
 Ecart max = 6 dB  
 $\sum$  Ecart  $\sim$  25 dB  
 Ecart  $R_w \sim$  3 dB

**Tableau 13** : calage calcul AcouStiff – OF2 en 8/14/10



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 1

### Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai

-o- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx bois avec un vitrage 44.2 / 6 / 8

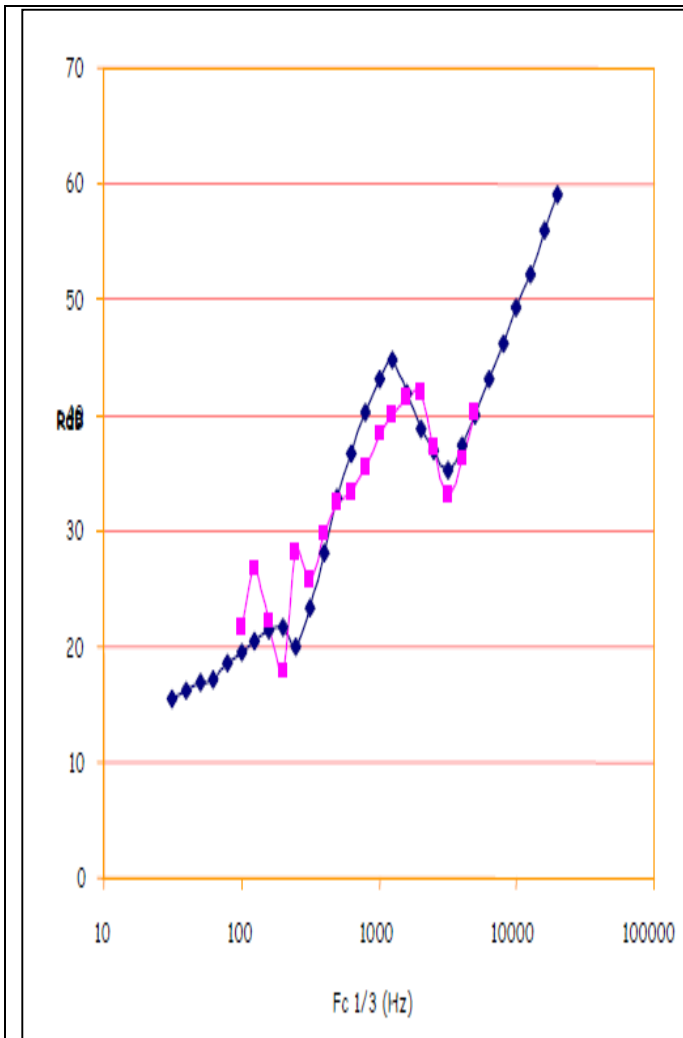
— : Modèle de Calcul AcouStiff ajusté après calage avec les valeurs obtenues par essai,

Prise en compte du vitrage feuilleté, dissymétrique et de la liaison périphérique rigide 2,7 m

### Evaluation de la qualité du calcul :

Modélisation A-  
 Ecarts max = 6 dB  
 $\sum$  Ecarts ~45 dB  
 Ecart  $R_w$  ~3 à 5 dB

**Tableau 14** : calage calcul AcouStiff – OF2 en 44.2/6/8



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 1

**Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai**

-■- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2 vtx bois avec un vitrage 4 / 12 / 4

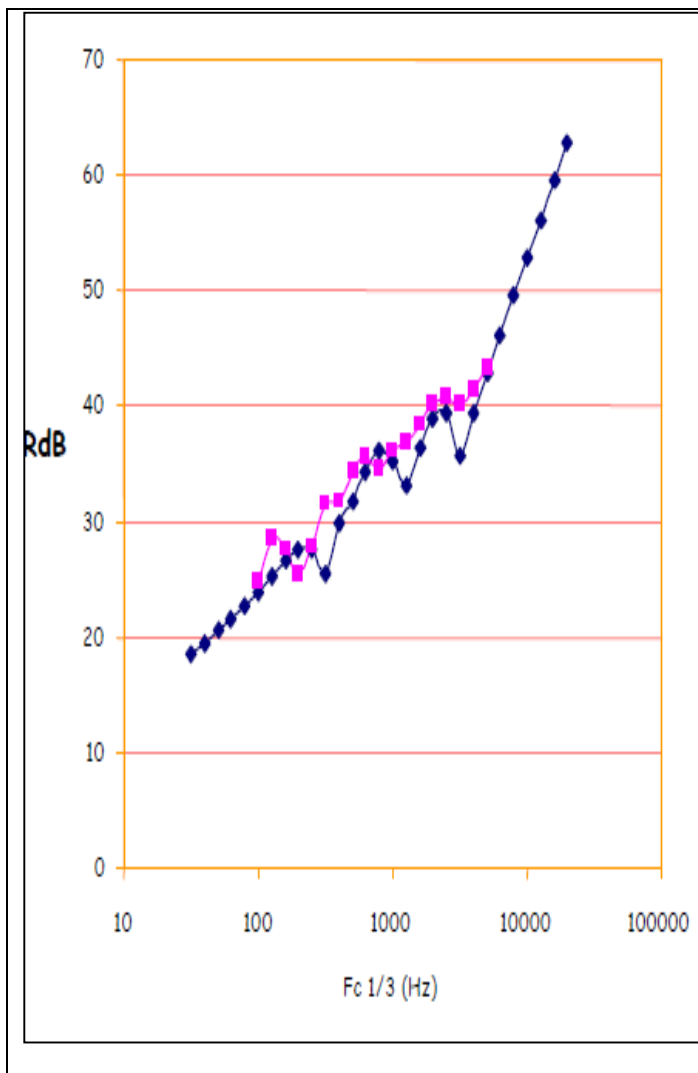
-◆- : modèle de Calcul AutoSEA ajusté après calage avec les valeurs obtenues par essai,

Prise en compte du vitrage dissymétrique et de la liaison périphérique rigide 2,7 m

**Evaluation de la qualité du calcul :**

Modélisation A  
 Ecarts max = 8 dB  
 $\sum$  Ecarts ~30 dB  
 Ecart  $R_w$  ~3 dB

**Tableau 15** : calage calcul AutoSEA – OF2 en 4/12/4



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 1

**Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai**

-■- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2 vtx bois avec un vitrage 44.2 / 12 / 4

-◆- : modèle de Calcul AutoSEA ajusté après calage avec les valeurs obtenues par essai,

Prise en compte du vitrage feuilleté, dissymétrique et de la liaison périphérique rigide 2,7 m

**Evaluation de la qualité du calcul :**

Modélisation A+  
 Ecart max = 6 dB  
 $\sum$  Ecart ~15 dB  
 Ecart  $R_w$  ~3 dB

**Tableau 16** : calage calcul AutoSEA – OF2 en 44.2 / 12 / 4

**5.2 Phase 2 de l'étude : optimisation des 2 modèles**

**5.2.1 Expérimentation SEA inverse sur porte-fenêtre et fenêtre**

Les mêmes concepts d'équations d'équilibre énergétique utilisés dans les méthodes SEA analytiques peuvent servir de base pour un post-traitement des données de bruit et de vibrations dans une forme particulièrement utile à la conception. Cette méthode de mesure est nommée « SEA expérimentale », elle est très utilisée en vibro-acoustique industrielle notamment pour les véhicules.

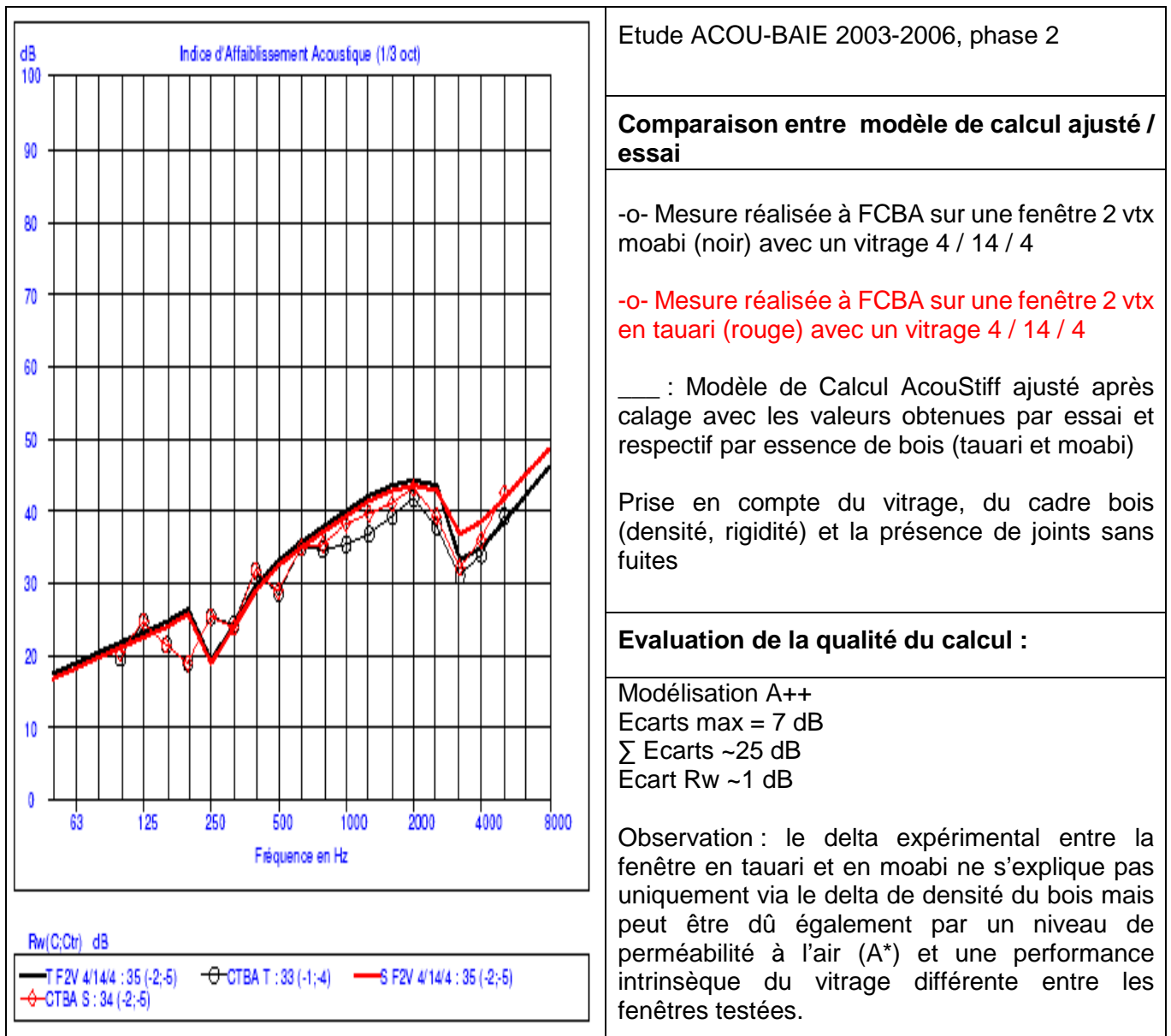
Cette phase a permis la création d'une base de données de paramètres réutilisables dans les modèles prédictifs. Les observations expérimentales du comportement des systèmes permettent de mettre en évidence la complexité des échanges vibratoires, surtout dans les moyennes fréquences. Le cadre de la fenêtre ne transmet pas significativement d'énergie et contribue essentiellement à la raideur dynamique du vitrage. Il n'a donc une influence qu'en très basse fréquence comme pilote de la fréquence d'oscillation des modes rigides de vitre.

De plus, le modèle a été amélioré par le développement d'un outil multicouche TMM pour le vitrage.

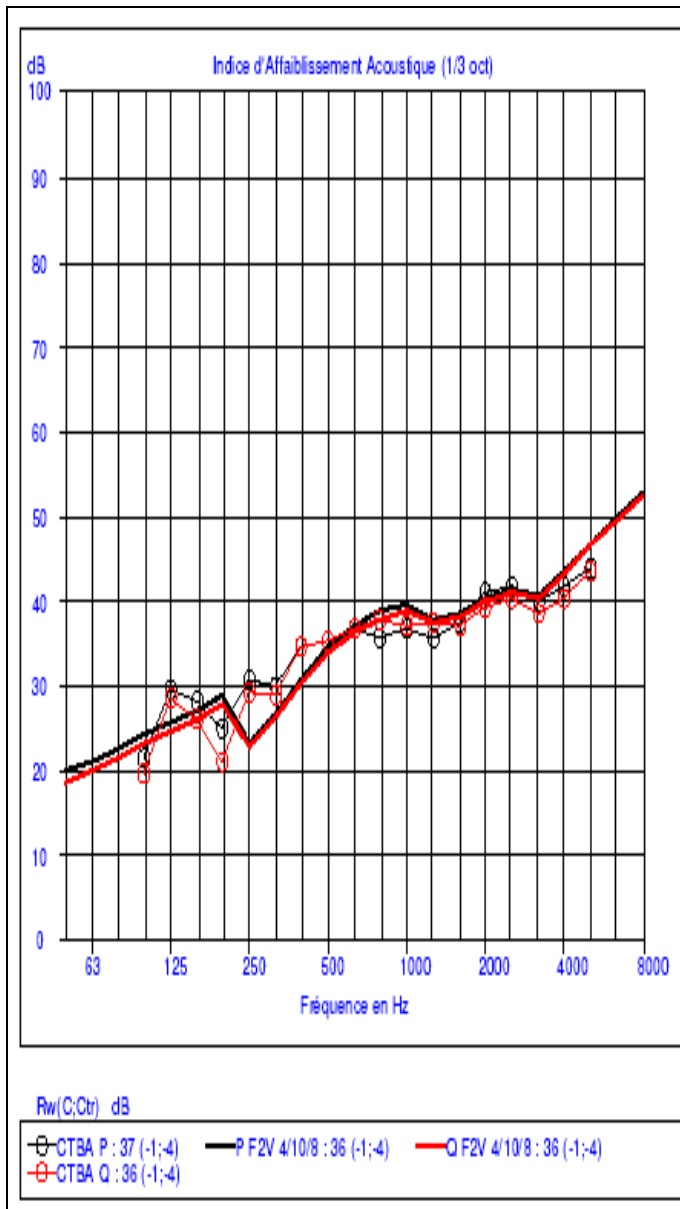
### 5.2.2 Expérimentation modèle acoustiff

La première série de calculs réalisée en phase 1 a été complétée en phase 2 par une seconde série de mesures mettant en jeu un bien plus grand nombre de paramètres. Dans ces mesures, nous avons introduit des paramètres variables tels que l'essence de bois et la surface de vitrage. A ce stade, les données d'entrée du modèle Acoustiff ont été améliorées : les cadres sont simulés par une loi de masse et la surface de vitrage est prise supérieure au clair de vitrage. Les calculs sont réalisés en prenant en compte les caractéristiques physiques des éléments (densité, rigidité) et la présence de joints sans fuites. Le calcul résulte de la combinaison des affaiblissements acoustiques des différents composants, en proportion de leur surface.

Le travail reste basé sur la confrontation entre essais et calcul ajustés. Les valeurs obtenues par essai ont aidé au « calage » du modèle de calcul pour obtenir un modèle ajusté.



**Tableau 17** : calage calcul AcouStiff – OF2 en 4 / 14 / 4 respectivement en moabi et tauari



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 2

### Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai

-o- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx en moabi avec un vitrage 4 / 10 / 8

-o- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx en tauari avec un vitrage 4 / 10 / 8

\_\_\_ : Modèle de Calcul AcouStiff ajusté après calage avec les valeurs obtenues par essai et respectif par essence de bois (tauari et moabi)

Prise en compte du vitrage, du cadre bois (densité, rigidité) et la présence de joints sans fuites

### Evaluation de la qualité du calcul :

Modélisation A++  
Ecart max = 7 dB  
 $\sum$  Ecart ~20 dB  
Ecart Rw ~1 dB

**Tableau 18** : calage calcul AcouStiff – OF2 en 4 / 10 / 8 respectivement en moabi et tauari

Le calage du modèle de calcul est satisfaisant.



### 5.3 Phase 3 de l'étude : modélisation complète sur un bloc-baie avec entrée d'air

Dans cette partie, nous présentons la modélisation la plus complète de la baie. La fenêtre, vitrage et ossature, est modélisée seule. Ensuite, le coffre de volet roulant, l'entrée d'air et les fuites, sont introduites dans l'outil. Pour la menuiserie seule nous exploitons le modèle AcouSTIFF® pour le reste des chemins de passages nous exploitons les codes SEA, SEA-XP, Double-Vitre et Multiplaque. Ces routines de calcul permettent de gérer avec plus de précision que les formules SEA standard, les transmissions acoustiques ou vibratoires.

Double-vitre est dédié au calcul des transmissions acoustiques et a fait l'objet de validation dans le domaine de l'automobile, avec un fabricant des matériaux insonorisant. Multiplaque est dédié au calcul des transmissions solidiennes et a fait l'objet de validations au travers d'études relatives à la transmission des chocs pyrotechniques dans le domaine de l'aérospatial.

Les chemins de transmission vibratoire au sein d'une menuiserie bois avec coffrage sont multiples. Ils sont schématisés sur la figure ci-après. On distingue :

1. Les transmissions par rayonnement acoustique des structures : rayonnement du coffre, du cadre, du double vitrage,
2. Les transmissions par fuite acoustique au travers des ouvertures (prise d'air du coffrage ou usure des joints),
3. Les transmissions acoustiques latérales, essentiellement dues au couplage mécanique des différents éléments de structure.

On peut supposer que les énergies de ces trois types de chemin sont simplement additives et non corrélées, ce qui permet une modélisation séparée de chaque chemin.

Le calage du modèle a été réalisé à partir de résultats de mesures sur 8 menuiseries testées à FCBA. Puis le calcul sur la baie complète (modèle ACOU-BAIE) a été réalisé sur deux blocs baies conçus et testés spécifiquement : fenêtre 2vtx + coffre de volet roulant (CVR) + bouche d'entrée d'air (EA).

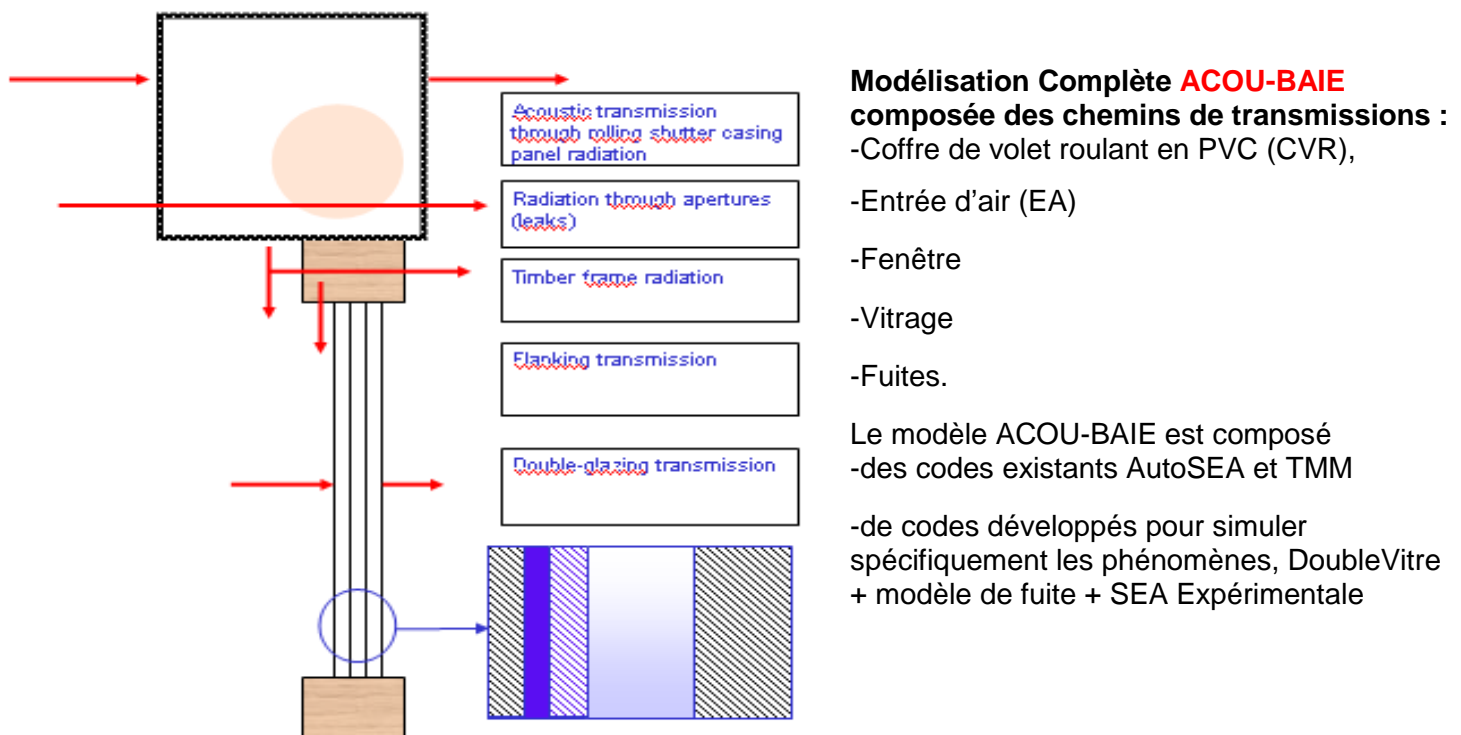


Figure 19 : Schéma de transmission vibratoire pour un bloc-baie complet

Le travail reste basé sur la confrontation entre essais et calcul ajustés. Les valeurs obtenues par essai ont aidé au « calage » du modèle de calcul pour obtenir un modèle ajusté.

Observation : La liaison ouvrant dormant des fenêtres testées a été réglée au mieux selon les préconisations du fabricant cependant le niveau de perméabilité à l'air des menuiseries n'a pas été vérifié sur le caisson d'essai acoustique.

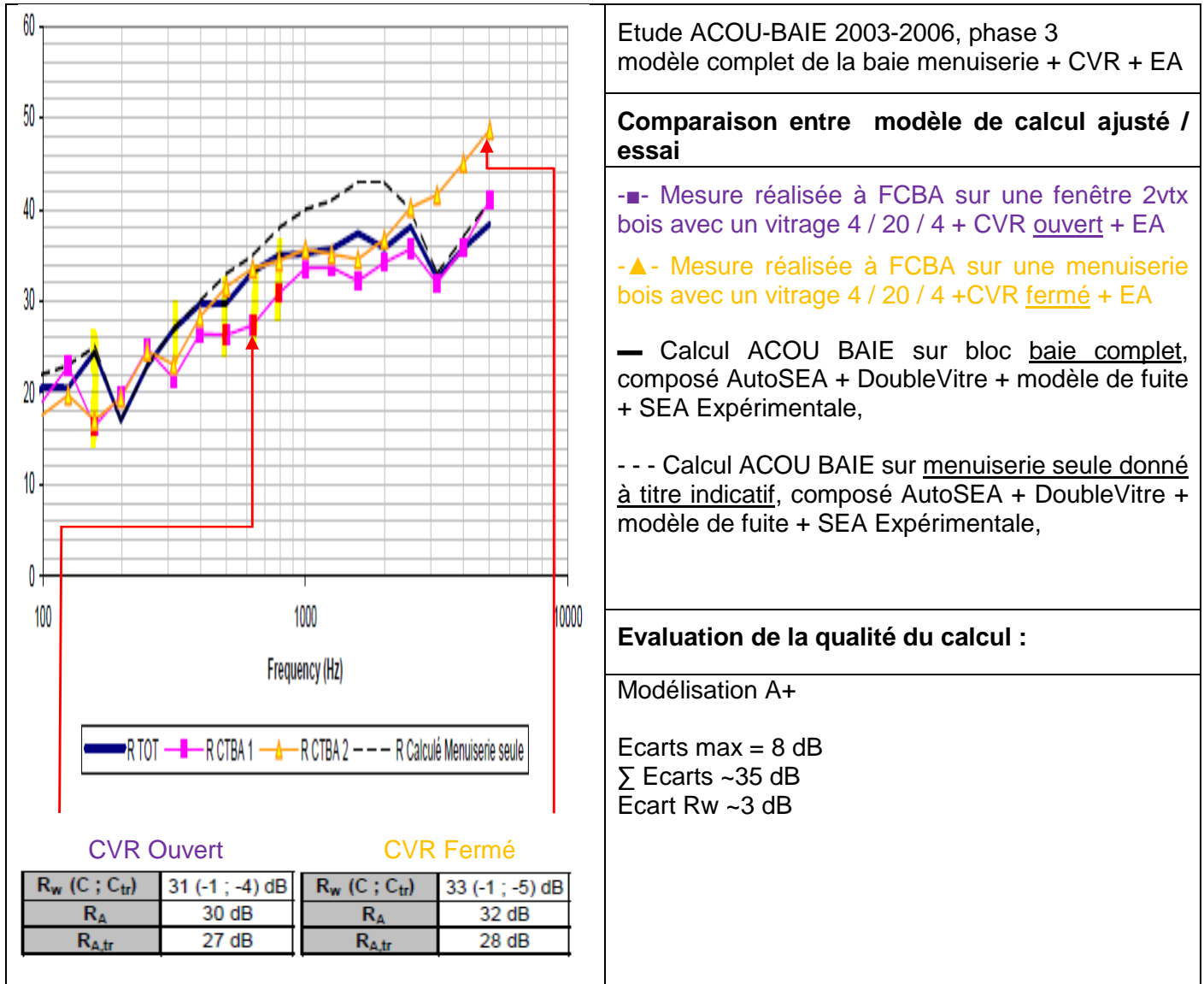
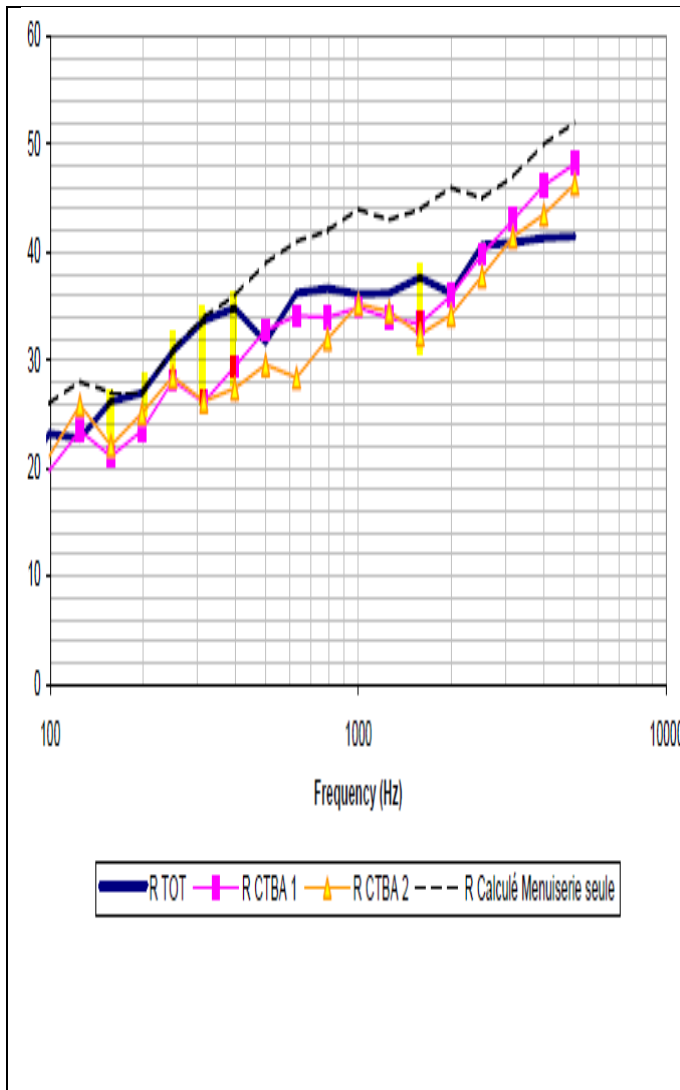


Figure 20 : calage calcul Acou Baie – bloc baie en 4 / 20 / 4

Le calcul permet de retrouver le comportement phénoménologique global d'une baie. La modélisation est donc assez satisfaisante pour la plage de fréquence partant de la fréquence de résonance jusqu'à 6 000 Hz ; c'est à dire pour la quasi-totalité de la plage de fréquence usuelle.



Etude ACOU-BAIE 2003-2006, phase 3  
modèle complet de la baie menuiserie + CVR + EA

### Comparaison entre modèle de calcul ajusté / essai

-▲- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx bois avec un vitrage 44.2 / 6 / 8 +CVR ouvert + EA

-■- Mesure réalisée à FCBA sur une fenêtre 2vtx bois avec vitrage 44.2 / 6 / 8 + CVR fermé + EA

— Calcul ACOU BAIE sur bloc baie complet, composé AutoSEA + DoubleVitre + modèle de fuite + SEA Expérimentale,

- - - Calcul ACOU BAIE sur menuiserie seule donné à titre indicatif, composé AutoSEA + DoubleVitre + modèle de fuite + SEA Expérimentale,

Evaluation de la qualité du calcul :

Modélisation A-  
Ecart max = 12 dB  
 $\sum$  Ecart  $\sim$  35 dB  
Ecart  $R_w \sim$  3 à 5 dB

Ecart entre modélisation et essai est dû à une modélisation encore inadapté du feuilleté en BF

Figure 21 : calage calcul Acou Baie – bloc baie en 44.2 / 6 / 8

### Ce qu'il faut retenir :

Après le calage du modèle ACOU-BAIE par l'addition de modèles complémentaires (AutoSEA + DoubleVitre + modèle de fuite + SEA Expérimentale) le calcul d'un bloc baie a été expérimenté pour la 1<sup>er</sup> fois. L'écart sur la valeur de l'indice  $R_w(C ; Ctr)$  entre le modèle ACOU-BAIE ajusté et la mesure est de l'ordre de 3dB pour le bloc baie (menuiserie + CVR + EA) testé avec double vitrage 4 20/4. En revanche, pour le bloc baie avec un vitrage feuilleté 44.2/6/8, l'écart obtenu est de l'ordre de 3 à 5 dB.

En dessous de la fréquence de résonance (zone en basse fréquence), il apparaît un comportement plus chaotique. Dans cette zone, la prise en compte des modes par le calcul n'est pas suffisante.

Il conviendrait notamment d'optimiser le calage de la modélisation des vitrages isolants, éventuellement, via un complément par élément finis (FEM).

Le modèle 'ACOUBAIE' est aujourd'hui au stade de maquette.

## 6. Faisabilité adaptation du modèle ACOU BAIE par type de besoins des professionnels

BESOIN en outil de prédiction		QUI est concerné	OBJECTIF de qualité du modèle à viser par rapport à la mesure en Laboratoire (*)	Faisabilité sur adaptation Modèle ACOU-BAIE / objectif	Développement nécessaire du modèle ACOU BAIE
1	Mieux comprendre les domaines de l'isolation acoustique	Menuisiers et gammiste	A+ (***) Ecart $R_w$ : +/- 2 dB	Envisageable	Améliorer la précision du calage du modèle et le confronter à l'aveugle via campagne d'essai
2	Aide à la conception et « pré dimensionnement acoustique » d'une gamme de menuiseries	Menuisier gammiste			
3	Orienter la constitution du produit pour répondre à une demande spécifique	Menuisier, prescripteur, BE acoustique			
4	Gérer les extensions et/ou interpolation de performances acoustiques et non prévues par les normes actuelles	Menuisier gammiste, laboratoire, BE acoustique, contrôleur technique, normalisateur	A++ Ecart $R_w$ : +/- 1 dB	Envisageable uniquement si modélisation vitrage plus précise	Action collective Française avec filière du verre et filière menuiserie (tx matériaux) puis européenne pour reconnaissance du modèle
5	Evaluer la performance acoustique d'une menuiserie sous méthode normalisée et accrédité	Tous les acteurs	A++ Ecart $R_w$ : +/- 1 dB et Fiable sur l'ensemble des fréquences	Envisageable uniquement si modélisation vitrage plus précise et recours à calcul par éléments finis Banque de donnée des composants nécessaires	Obtention du niveau de qualité requis puis reconnaissance (idem §4) par l'ensemble des acteurs nécessitant l'adoption par l'ensemble de la communauté d'un changement dans les habitudes de validation par essai à validation par calcul (**)

**Tableau 22** : Faisabilité d'adaptation du modèle ACOU BAIE par types de besoins des professionnels

(\*) Pour un laboratoire sous accréditation COFRAC, l'incertitude liée au respect des normes acoustiques sur la mesure de l'indice globale  $R_w$  est estimé à +/- 2 dB.

(\*\*) Analogie possible avec les performances thermiques des fenêtres qui sont essentiellement obtenues via calculs numériques (FEM) encadré par des référentiels ISO et EN et une bibliothèque de données d'entrée (conductivité thermique des matériaux).

(\*\*\*) Voir définition niveau A en page 25

## 7. Analyse du besoin pour consolider le modèle de calcul ACOU BAIE

Les besoins en développement techniques sont :

- Calage du modèle ACOU BAIE: Plan d'expérience constitué de
  - Fenêtre – porte-fenêtre avec perméabilité à l'air A\*4 vérifiée
  - Optimisation du calage du modèle ACOU BAIE pour les vitrages isolants, en particulier les feuilletés : recours à des éléments finis ?
  - Typologies de fenêtres bois différentes (Gueule de loup, recouvrement jeu de 4 / jeu de 12mm, mixte bois alu....)
  - Fenêtres avec composants différents : seuil, joint d'étanchéité, assemblage, essence de bois
- Confrontation à l'aveugle des modèles calés,
- Analyse d'influence de la validité des modèles,
- Identification des modèles acceptables par besoin identifiée par les professionnels (voir tableau 17),
- Recours à des éléments finis dans le modèle ACOU-BAIE nécessitant la création d'une base de données génériques sur les composants.

Capacité du modèle de calcul		Besoin en développement	Partenaires
1	Mieux comprendre les domaines de l'isolation acoustique	Module d'amélioration du calage du modèle de calcul avec mesure des caractéristiques débits de fuite / type de chicane / raideur profilé / vitrage (film pvb) / remplissage  Pour établir des courbes génériques par typologie de fenêtre  Laboratoire d'essai : Campagne d'essai sur vitrage, joint, A*, remplissage et fenêtre dim. Acotherm	Concepteur éditeur de logiciel avec compétence en calcul et expertise en phénomènes acoustiques  Filière verre et menuiserie
2	Aide à la conception et « pré dimensionnement acoustique » d'une gamme de menuiserie		
3	Orienter la constitution du produit pour répondre à une demande spécifique		
4	Gérer les extensions et/ou interpolation de performances acoustiques mesurées initialement par essai et non prise en compte par les normes	Réalisation point 1.2.3 + modélisation vitrage approfondie + Montage Bibliothèque de données (mesurées par essai et représentative statistiquement) vitrage, joint.  Normalisation / certification	Concepteur éditeur de logiciel avec compétence en calcul et expertise en phénomènes acoustiques  Filière verre et menuiserie et autres centres techniques expert  Normalisateurs et certificateurs en acoustique et en menuiserie
5	Evaluer la performance acoustique d'une menuiserie sous méthode normalisée et accrédité	Données entrée via PV d'essai et/ou bibliothèque (validée et représentative statistiquement) sur l'ensemble des composants impactants : vitrage, joint, seuil,.....  Normalisation / certification / réglementation	Concepteur éditeur de logiciel avec compétence en calcul et expertise en phénomènes acoustiques  Filière verre et menuiserie et autres centres techniques expert Et normalisateur et certificateurs en acoustique et en menuiserie Et pouvoir public

**Tableau 23** : Besoins en développement et partenaires par niveau de capacité du modèle de calcul

## 8. Conclusion

Chacune des méthodes FEM, SEA et TMM permet de réaliser des calculs pouvant atteindre une précision adaptée dans un domaine spécifique. La qualité du modèle de calcul ajusté par rapport aux mesures expérimentales réside dans l'utilisation de plusieurs méthodes couplées.

L'étude ACOU-BAIE 2003-2006 et d'autres études en cours démontrent l'avantage de coupler ces trois méthodes de calcul. A noter que cette pratique est généralisée en R&D au niveau international pour le secteur de la construction et les secteurs du transport. Chaque méthode permet de calculer une partie du spectre. Une menuiserie pourrait être modélisée en basses fréquences à l'aide de la FEM. Puis, couvrir les moyennes et hautes fréquences en utilisant la SEA qui intégrerait des interfaces TMM pour les multicouches et permettrait la prise en compte de raidisseurs ou de connections entre les vitrages.

La présente étude de faisabilité ACOU BAIE permet d'identifier également que :

- La modélisation de la menuiserie nécessite au préalable une meilleure modélisation des vitrages et donc collaboration avec l'ensemble de la filière du verre / vitrage.
- Le manque de pertinence de continuer sur ce sujet avec uniquement la filière menuiserie bois : ouverture nécessaire à l'ensemble de la filière menuiserie tous matériaux (PVC, aluminium,..).
- La modélisation acoustique doit d'abord se baser sur une hypothèse de perméabilité à l'air de la fenêtre maîtrisée et vérifiée (c'est le cas actuellement via les marques de qualité de fenêtre). Un module de dégradation de la performance acoustique en fonction de la dégradation du niveau de perméabilité à l'air pourrait ensuite être étudié.

Pour ensuite aller plus loin, il faudrait proposer à différents éditeurs de logiciels acoustiques de coder des outils simples à destination des industriels de la menuiserie et procéder à des confrontations calculs/essais pour valider les niveaux de capacité recherchés et les faire valoir auprès des commissions de normalisation, certification et pouvoir public.

Capacité du modèle de calcul		Professionnels pouvant être intéressés
1	Mieux comprendre les domaines de l'isolation acoustique	Menuisiers et gammiste
2	Aide à la conception et « pré dimensionnement acoustique » d'une gamme de menuiserie	Menuisier gammiste
3	Orienter la constitution du produit pour répondre à une demande spécifique	Menuisier, prescripteur, BE acoustique
4	Gérer les extensions et/ou interpolation de performances acoustiques mesurées initialement par essai et non prise en compte par les normes	Menuisier gammiste, laboratoire, BE acoustique, contrôleur technique, normalisateur
5	Evaluer la performance acoustique d'une menuiserie sous méthode normalisée et accrédité	Tous les acteurs

Les développements par type de capacité de modèle de calcul sont informés/renseignés au §6 et §7 du rapport.