

## Les Guides Acoustiques

# Partie 2 : Réaliser son propre Bilan Acoustique

filidan-pda0@gmail.com

<https://audiomaboules.fr/>

<http://forum-hifi.fr/>

Version 2.1 – Septembre 2021



<b>PREAMBULE</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION / POURQUOI FAIRE DES MESURES ?</b>	<b>4</b>
<b>LA PIECE D'ECOUTE</b>	<b>7</b>
<b>Champ direct et Réflexions</b>	<b>7</b>
<b>Phénomènes Physiques et Psycho-acoustique</b>	<b>8</b>
La zone modale :	9
La zone réverbérée	11
Evolution de l'énergie sonore	11
Spectre fréquentiel (=réponse amplitude/fréquence) des réflexions	14
Distance Critique	16
En résumé, ce qu'on peut retenir :	17
<b>Et ça donne quoi avec le vocabulaire des « audiophiles » ?</b>	<b>18</b>
<b>Et les paramètres acoustiques ?</b>	<b>21</b>
RT60 définition et utilisation :	21
RT60 « idéal » ou cible	24
Calcul de la Distance Critique	26
Calcul de la fréquence de Schröder	27
Quelles sont les mesures utiles pour mettre au point son système ?	28
A. Mesures intrinsèques aux enceintes :	28
B. Mesures qui dépendent du local/pièce d'écoute :	29
C. Mesures qui représentent l'interaction entre le système et le local :	29
Mais quel est le lien avec ce qu'on entend ?	30
Comment réaliser ces mesures ?	32
Quelques recommandations préalables :	33
<b>ANALYSER SON BILAN ACOUSTIQUE</b>	<b>34</b>
<b>Quelles mesures analyser ?</b>	<b>35</b>
<b>Quels objectifs pour chaque type de mesure ?</b>	<b>35</b>
RT60	36
Courbe de réponse Fréquence/Amplitude	38
Spectrogram	40
Decay	44
ETC	47
Impulse, Step et Phase	50
<b>QUELLES ACTIONS CORRECTIVES MENER ?</b>	<b>57</b>
Choix des enceintes vs Local d'écoute	59
Actions sur le temps de réverbération et les réflexions primaires :	60
Actions sur les ondes stationnaires :	67
Actions sur la phase :	72



<b>TABLEAU DE SYNTHÈSE ET GRILLE D'ÉVALUATION SUBJECTIVE</b>	<b>73</b>
<b>QUELQUES CONSIDÉRATIONS PERSONNELLES</b>	<b>75</b>
<b>ANNEXE 1 : EXEMPLES D'UTILISATION DE L'ETC</b>	<b>77</b>
<b>ANNEXE 2 : REGLAGES AFFICHAGES GRAPHES DE REW</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXE 3 : DOCUMENTS, LIENS ET RÉFÉRENCES</b>	<b>86</b>
<b>ANNEXE 4 : UTILISATION DES ABAQUES AVEC REW</b>	<b>87</b>
<b>ANNEXE 5 : FRÉQUENCES DES INSTRUMENTS ET VOIX</b>	<b>89</b>
<b>ANNEXE 6 : EXEMPLES DE DIAGNOSTIC</b>	<b>90</b>



## Préambule

En tant que simple amateur de musique, et n'ayant aucune compétence particulière en acoustique, ou en traitement numérique, ou encore en conception d'enceintes ou autre élément Hifi, je ne partage ici que mon expérience d'autodidacte.

J'ai, évidemment, largement puisé dans de nombreuses lectures sur le net ou dans des documents trouvés au fil du temps, (et j'en mentionne les références chaque fois que possible : lorsque je les ai encore sous la main, ce qui n'est hélas pas toujours le cas), et donc je n'ai strictement rien découvert ou inventé, j'ai juste essayé de mettre un peu d'« ordre » dans le bazar général et les contradictions apparentes qu'on trouve un peu partout...

Je tiens aussi à préciser que mon approche du sujet n'est ni exhaustive, ni scientifique, mais juste pragmatique. Mon objectif n'était pas de tout comprendre, ou expliquer, d'un point de vue théorique, mais juste de définir une « méthode » permettant d'orienter les choix d'amélioration du système qui soit la plus « objective » possible.

De plus, je ne prétends pas que les informations ci-après ne comportent pas nombre d'erreurs et d'approximations car c'est juste ma synthèse personnelle de ce que j'ai compris du sujet, et des conclusions que j'en ai tirées pour mon propre système hifi.

L'objet de ce document est donc, simplement, de donner un modeste éclairage sur le sujet, qui sera peut-être utile à ceux qui s'interrogent sur comment améliorer leur système, et qui cherchent à rationaliser, ou disons, mieux « objectiver » leurs choix.

On y trouvera d'abord une explication sur l'intérêt de faire des mesures acoustiques, quelques considérations sur la pièce d'écoute et notre perception psycho-acoustique des phénomènes physiques en jeu, une tentative de lien entre les critères « audiophiles » et les paramètres « acoustiques », et enfin une méthode pour réaliser et analyser son propre diagnostic acoustique à peu de frais. Il donne ensuite quelques pistes possibles pour mettre en œuvre un plan d'amélioration cohérent et efficace.

Enfin, ce document pourra, peut-être, être utile à ceux qui souhaitent faire appel à un professionnel de l'acoustique pour aménager/améliorer leur local d'écoute, en leur donnant les notions minimales à connaître pour une discussion constructive sur des bases « objectives » avec l'acousticien. De même, en comparant les mesures du départ avec celles obtenues après l'intervention du professionnel, on pourra vérifier que les paramètres principaux ont progressé, et correspondent bien aux attentes.

Ceux qui souhaiteraient discuter sur les sujets abordés dans ce document peuvent le faire sur les fils de discussion de ce Guide sur les forums, en cliquant sur l'un ou l'autre des liens suivants : <https://audiomaboules.fr/> ou sur <http://forum-hifi.fr/>.



## Introduction / Pourquoi faire des mesures ?

Tout d'abord, si votre système Hifi vous donne pleine satisfaction et qu'aucune évolution pour l'améliorer n'est au programme, il me semble bien plus intéressant de consacrer son temps à écouter de la musique et profiter du système, plutôt que de se lancer dans des mesures et leur interprétation !

Mais si vous êtes en train de lire ceci, c'est peut-être parce que vous recherchez la petite amélioration, le tweak qui va faire la différence et apporter le petit plus de musicalité qui manque encore à votre système. Faut-il un nouveau câble secteur, un câble HP, un nouveau lecteur réseau ou encore de nouvelles enceintes ou bien un traitement passif dans votre pièce d'écoute ? Bref, les questions habituelles des écumeurs de forum audiophiles en quête de belle musique à la maison !

Par ailleurs, la simple écoute (avec des oreilles en or de préférence !) est souvent considérée par certains comme la seule « vraie » façon de régler son système. Les mesures étant présentées comme peu représentatives de ce que l'oreille entend, car elles sont obtenues avec un micro, qui n'entend pas comme nous les humains, et donc c'est forcément erroné, inutile et une perte de temps, etc...

Pourtant, et même si nos oreilles fonctionnent correctement, notre mémoire auditive n'est pas infaillible (en tous cas la mienne) ! Personnellement, si je me rends souvent compte facilement qu'il y a quelque chose qui cloche, je ne sais pas toujours identifier de façon précise quelle en est la cause, et même, très souvent, je ne sais même pas exprimer clairement ce qu'est, ce quelque chose qui cloche...

### La Pensée du jour

*On peut quand même se demander pourquoi aurait-on besoin de mesurer alors qu'on ne l'a jamais fait dans le passé et qu'on n'a pas attendu les mesures pour avoir de la bonne musique chez soi ?*

*A vrai dire, je crois que la réponse simple à cette question, somme toute assez pertinente, est qu'aujourd'hui c'est possible, facilement, chez soi, à très peu de frais et sans l'aide de quiconque. Il n'y a même pas besoin d'être un geek ou d'avoir une compétence technique quelconque. Je pense que tous ceux qui sont capables de se servir d'un PC ou d'un Mac pour surfer sur internet, sont capables de réaliser ces mesures et de les interpréter pour améliorer leur système.*

*Ces possibilités nouvelles qu'offrent l'informatique et le numérique, comme les logiciels de correction numérique, sont, à mon avis, une petite révolution à même de changer notre regard sur les produits disponibles sur le marché, et notre façon de consommer ces mêmes produits.*

Les dérivés Shadok





En fait, lorsqu'on demande à un audiophile quels sont les critères définissant la qualité d'un système hifi, on va le plus souvent entendre une liste comme celle-ci (non exhaustive et sans ordre particulier) :

- Le respect des timbres
- L'image (largeur, profondeur, précision, netteté)
- La dynamique (micro et macro)
- Les attaques de notes et la durée des extinctions des notes
- Le pincé des cordes, le rendu de la peau des percussions
- L'impact, la rapidité et la netteté des basses
- Le filé et la douceur des aigus
- La vie de la musique
- L'espace/l'air entre les instruments et solistes
- La définition
- La transparence

Auxquels on peut aussi ajouter ceux-ci :

- La crédibilité
- L'impression d'être transporté sur le lieu d'enregistrement ou bien que ce sont les musiciens qui sont transportés chez soi.
- Le son « analogique », l'absence de duretés « numériques »
- Etc...

Par ailleurs, lorsqu'on fait une analyse acoustique de son système, les paramètres qu'on va mesurer, discuter et analyser se nomment :

- Amplitude/Fréquence
- Spectrogram
- Decay
- ETC (Energy Time Curve)
- Temps de Réverbération (RT60, T20, T30, EDT ...)
- Phase, Impulsion, STEP
- Distance critique
- Modes, trainage, nœuds, ventres, ...

On a donc, d'un côté, des **critères audiophiles** qui sont **concrets** (dans la mesure où chacun les comprend, et le lien avec la musique paraît assez évident), mais qui se mesurent sur une **échelle** totalement **subjective**, qui est donc éminemment variable d'un audiophile à l'autre, et qui rend les comparaisons éventuelles difficiles ou sujettes à débat...



Et d'un autre côté, des **paramètres acoustiques** qui sont **abstrait**s (dans la mesure où leur signification n'a rien d'évident, et le lien avec la musique paraît assez éloigné), mais qui se mesurent sur une **échelle** parfaitement **objective**, qui permet des comparaisons faciles et sans ambiguïté (à méthode de mesure identique).

Ce décalage entre les **critères audiophiles subjectifs** mais **concrets**, et les **paramètres acoustiques objectifs** mais **abstrait**s explique probablement, au moins en partie, les réticences et les a priori, des audiophiles vis-à-vis des mesures acoustiques (ou autres mesures d'ailleurs...).

**Et soyons clairs, de facto, aucun de ces critères audiophiles tels qu'exprimés ci-dessus ne pourra jamais se mesurer directement avec un micro !**

Pourtant, pour l'avoir expérimenté en long et en large dans mon sous-sol, je peux garantir que **ces paramètres acoustiques, qu'on peut mesurer « objectivement », ont un vrai impact direct sur la plupart des critères audiophiles** listés ci-dessus, et chaque progrès objectif, sur ces paramètres, se traduit par une amélioration significative aisément perceptible à l'écoute (qu'on peut alors également qualifier selon des critères audiophiles classiques).

Il existe donc bien un lien entre ces critères audiophiles et les paramètres acoustiques, mais si on veut les appréhender et mieux les comprendre, il faut commencer par s'intéresser à ce qu'il se passe dans la pièce où on écoute son système !



## La pièce d'écoute

### CHAMP DIRECT ET REFLEXIONS

Une fois qu'on a installé son système, et surtout ses enceintes, dans sa pièce d'écoute (que ce soit le salon familial ou une pièce dédiée à la musique), en respectant, autant que possible, les consignes du fabricant pour les placer au mieux (ou bien en suivant les recommandations diverses qu'on trouve sur internet et les forum audiophiles), on se retrouve toujours confronté aux mêmes difficultés.

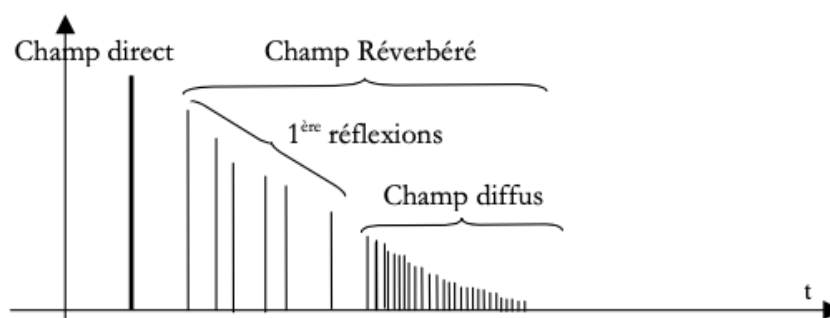
En effet, le son/musique que l'on entend au point d'écoute (sweet spot) est la somme de ce que l'on appelle le **champ direct** et des **réflexions**.



**Le champ direct** est le son émis par les enceintes, et comme celles-ci sont dirigées vers le sweet spot, c'est le son qui arrive en premier aux oreilles de l'auditeur.

**Les réflexions** sont l'ensemble des sons qui arrivent aux oreilles de l'auditeur après avoir été renvoyés, une ou de multiples fois, par les parois de la pièce (sol, murs, plafond), et comme la vitesse du son est constante (340m/s environ) ces diverses réflexions arrivent en séquence aux oreilles de l'auditeur, après le champ direct et après des durées qui sont uniquement fonction de la distance supplémentaire à parcourir vs le champ direct. On appelle aussi l'ensemble des réflexions, **le champ réverbéré**.

Schématiquement, si on représente l'évolution au fil du temps de l'Energie Sonore d'un son bref émis au temps 0, on obtient un schéma comme ci-dessous :





## PHENOMENES PHYSIQUES ET PSYCHO-ACOUSTIQUE

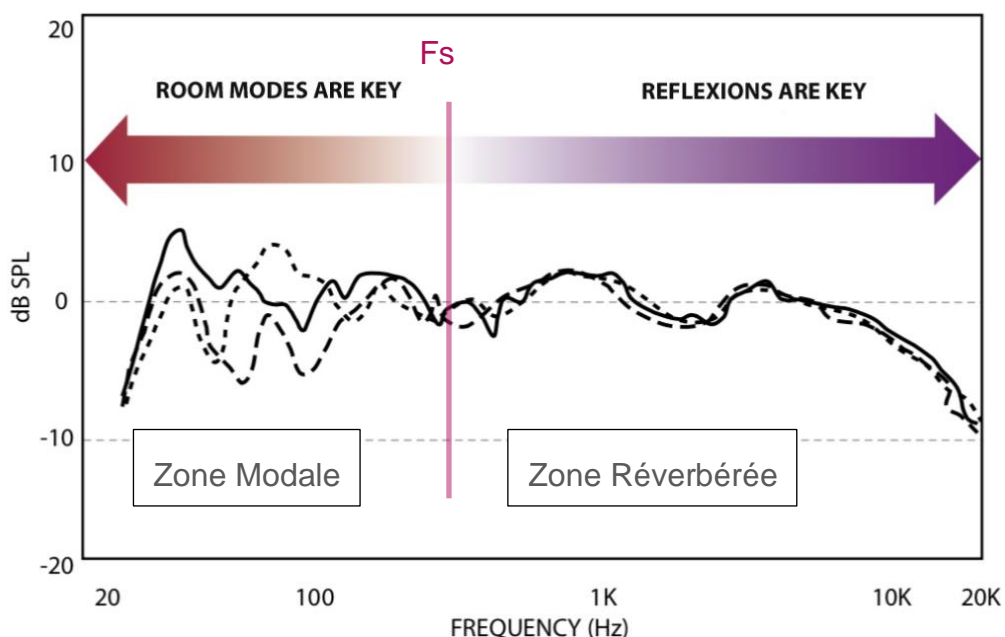
Ce que l'on entend est donc **la somme du champ direct et des réflexions**, et on comprend aisément que si le **champ direct contient toute l'information enregistrée**, **les réflexions** dans le local d'écoute, en s'ajoutant au champ direct, **vont déformer ce que l'on entend**, et suivant la nature et l'amplitude de ces déformations, vont participer positivement ou négativement à la performance globale du système.

Il est donc essentiel de comprendre la nature de ces diverses réflexions, ainsi que la façon dont elles sont intégrées par nos oreilles+cerveau, afin de pouvoir les maîtriser et ainsi les amener à contribuer à la performance du système, plutôt qu'à la dégrader.

Mais pour comprendre les effets des réflexions, il va falloir distinguer plusieurs phénomènes physiques de nature différente et regarder comment ils affectent notre perception du son. Pour ceux qui veulent plus de détails sur la nature du son et les phénomènes physiques qui en découlent, je conseille la lecture du lien suivant (<http://www.lafontaudio.com/criteres.htm>) qui est très bien fait.

En pratique, il suffit de savoir que dans le local d'écoute, on va avoir 2 zones fréquentielles qui n'auront pas le même comportement acoustique. Ces 2 zones sont situées de part et d'autre d'une fréquence ( $F_s$ ), dite de coupure, ou fréquence de Schröder, qui dépend uniquement des caractéristiques du local d'écoute (dimensions géométriques, et capacité d'absorption et diffusion des murs, sol, plafond). On verra un peu plus loin comment estimer cette fréquence de coupure.

Très schématiquement, on peut dire que la zone dite « modale » (au-dessous de  $F_s$ ) est la zone où le local d'écoute domine la restitution, et la zone dite « réverbérée » (au-dessus de  $F_s$ ) est la zone où les enceintes et les réflexions dominent la restitution.





## La zone modale :

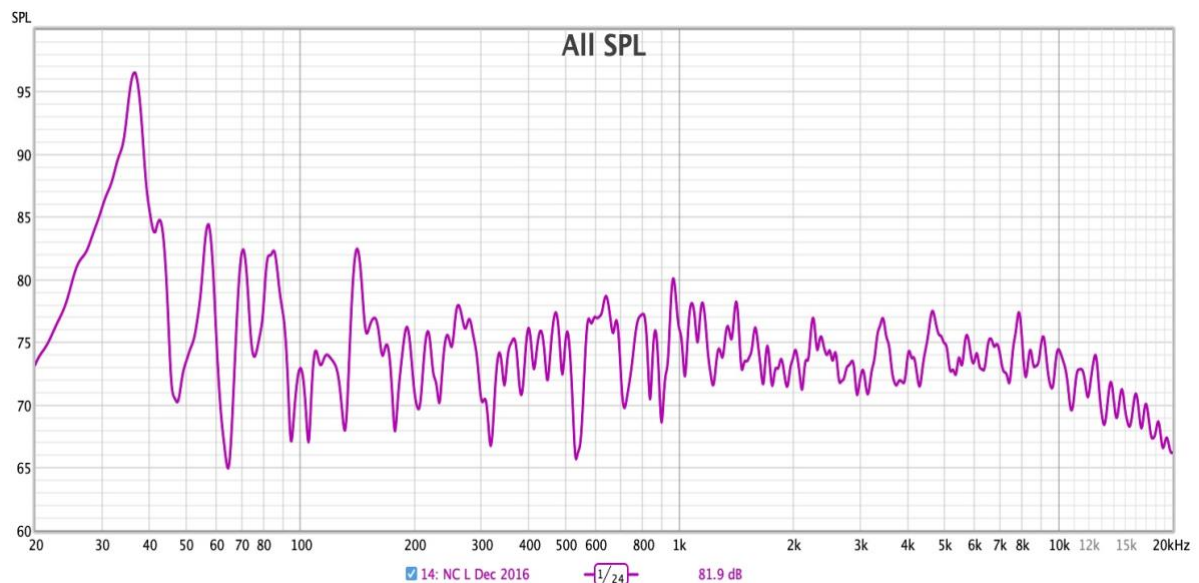
Dans la zone « modale », c'est assez simple à comprendre, le champ direct et les réflexions vont se combiner pour produire des ondes stationnaires qui est un phénomène physique classique en mécanique ondulatoire.

Cela se caractérise par des pics et des creux d'amplitude (niveau sonore) très marqués (15 à 20dB sont fréquents) à des fréquences qui ne dépendent que des dimensions géométriques du local d'écoute, et de la célérité du son dans l'air (340m/s)<sup>1</sup>.

Et, fait aggravant, ces pics d'amplitude sont également très stables, ce qui se traduit par une intensité sonore qui s'atténue beaucoup plus lentement que le reste des fréquences !

Ainsi, il n'est pas rare d'avoir un pic de 20dB vs le niveau moyen au départ, qui ne s'atténue que de 3 ou 5dB au bout de 2 dixièmes de seconde, alors que le niveau du reste du spectre s'est déjà atténué de 25 ou 30dB, ce qui met encore plus en évidence ces fréquences, et les rend encore plus gênante à l'écoute.

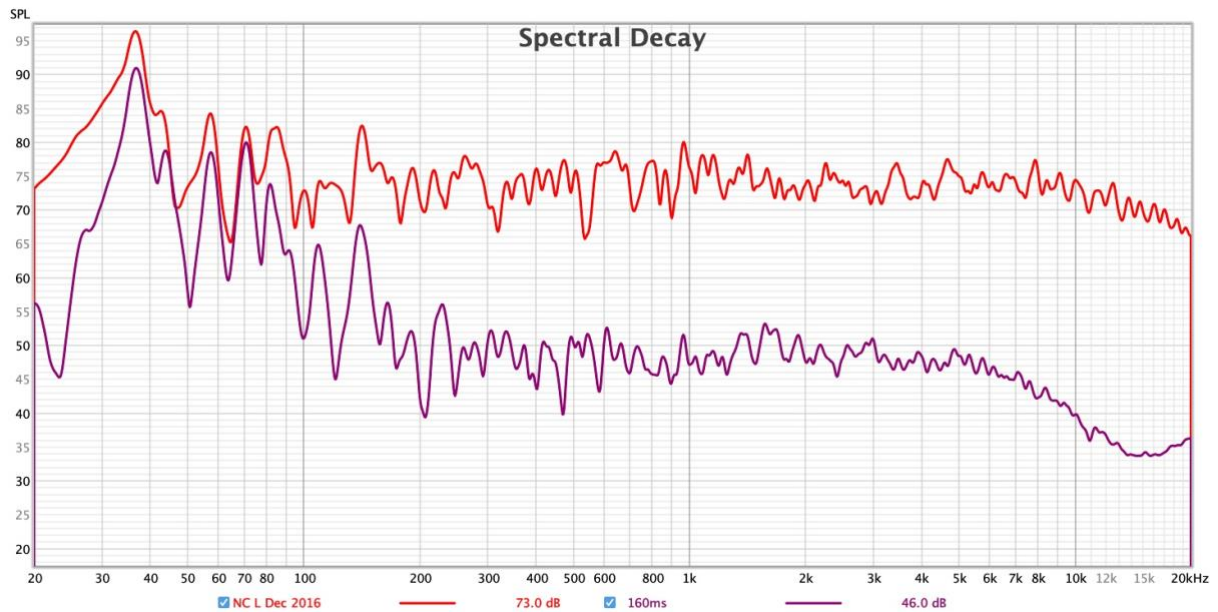
*Exemple ci-dessous du type de variations d'amplitude (lissage 1/24 d'octave) que peuvent créer ces modes en dessous de la fréquence de coupure (ici environ 250Hz).*



<sup>1</sup> Par exemple, si la longueur de la pièce est de 5.7 mètres, on va avoir un pic d'amplitude à la fréquence de 30Hz, mais aussi aux multiples entiers de cette fréquence (60Hz, 90Hz, 120Hz, etc...) qui seront gênants (audibles) jusqu'à, approximativement, la fréquence de Schröder. Et on a la même chose sur la largeur, la hauteur, mais aussi les dimensions obliques de la pièce, ce qui accentue encore le phénomène...



Et ci-dessous, le même graphe (rouge) avec la réponse après 160ms (violet). On voit que si le niveau moyen au-dessus de 200Hz est déjà descendu de plus de 30dB, le niveau des modes à 36Hz, 57Hz, 72Hz, 85Hz est à peine descendu de 5dB, ce qui accroît l'impression que le grave est ultra présent. **On appelle** souvent **ce phénomène**, le « **trainage** », car les fréquences concernées tardent à disparaître et donc traînent en durée...





## La zone réverbérée

Dans la zone « réverbérée », pour comprendre les phénomènes à l'œuvre, il va falloir s'intéresser à **l'évolution de l'énergie sonore au fil du temps**, puis au **spectre fréquentiel des réflexions** vs celui du champ direct, mais aussi à la **façon dont nos oreilles+cerveau interprètent les informations** reçues.

### Evolution de l'énergie sonore

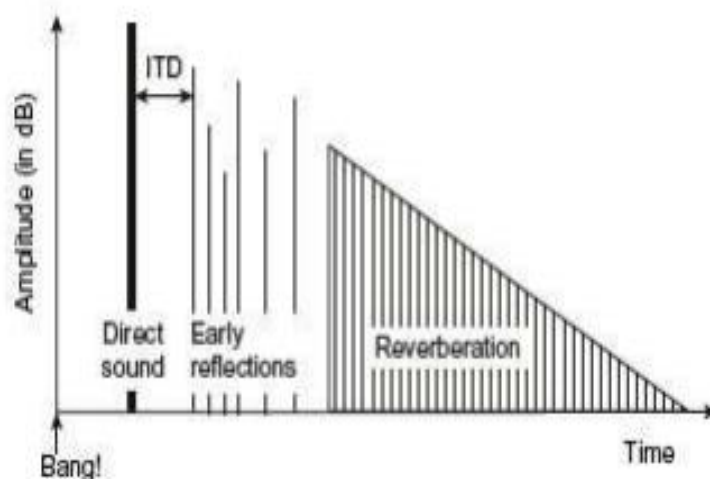
Les notions expliquées ci-après sont extraites d'un article plus général dont je conseille la lecture pour ceux qui souhaitent plus d'informations (<https://www.edn.com/acoustics-and-psychoacoustics-applied-part-1-listening-room-design/>)

Lorsqu'on écoute de la musique « live », que ce soit dans une salle de concert, une église ou une pièce quelconque, on reçoit le champ direct, puis d'abord, les premières réflexions du local au bout d'un temps ITD (Initial Time Delay) qui dépend de la taille du local, puis, un peu plus tard, les réflexions plus tardives qu'on appelle réverbération.

Ce temps ITD est une des caractéristiques du local que nos oreilles+cerveau utilisent pour déterminer la taille de la pièce (petite ou hall de gare par exemple).

De la même façon, on verra que la nature (spectre fréquentiel des premières réflexions puis des plus tardives) joue un rôle pour la création de l'image mentale que nous nous faisons du local où a lieu la performance.

Si on reprend l'évolution de l'Énergie Sonore (somme des énergies à toutes les fréquences audibles soit 20Hz-20 000Hz) on a donc quelque chose comme ceci :



Ces caractéristiques (intensité sonore, délais d'arrivée des réflexions, nature des réflexions et pente de décroissance de l'énergie) permettent donc à nos oreilles+cerveau de savoir « comment » est le local d'enregistrement.



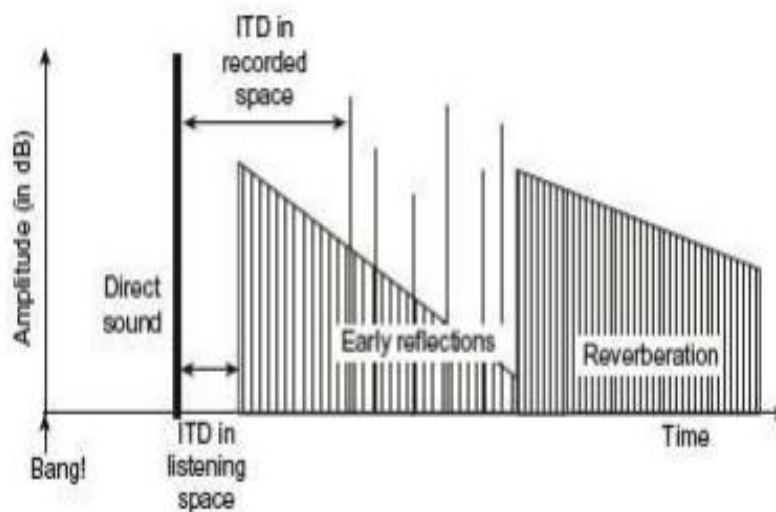
Et, lors de l'enregistrement de la performance musicale, ces caractéristiques sont, bien entendu, enregistrées également puisqu'elles font partie de la performance musicale (musique + local dans lequel elle est jouée = enregistrement).

Lorsqu'on va jouer cet enregistrement sur sa chaîne hifi, dans la pièce d'écoute, cette dernière a aussi ses propres caractéristiques (ITD + délais + nature des réflexions + pente de décroissance de l'énergie) qui vont s'ajouter à celles enregistrées.

Or, ce que l'on souhaite obtenir c'est la reproduction de l'ambiance du local d'enregistrement, et pas celle du local d'écoute !

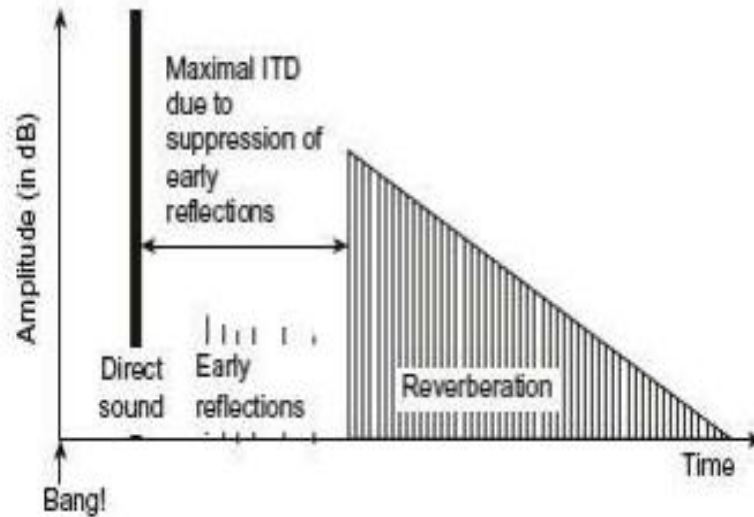
Comme le local d'écoute est généralement de taille plus modeste que celui d'enregistrement, son ITD va être plus court que celui du local d'enregistrement, et donc les réflexions du local d'écoute vont arriver plus tôt et masquer celles du local d'enregistrement.

On va donc se retrouver avec une ambiance qui n'aura rien à voir avec celle attendue, et qu'on peut schématiser comme ceci :



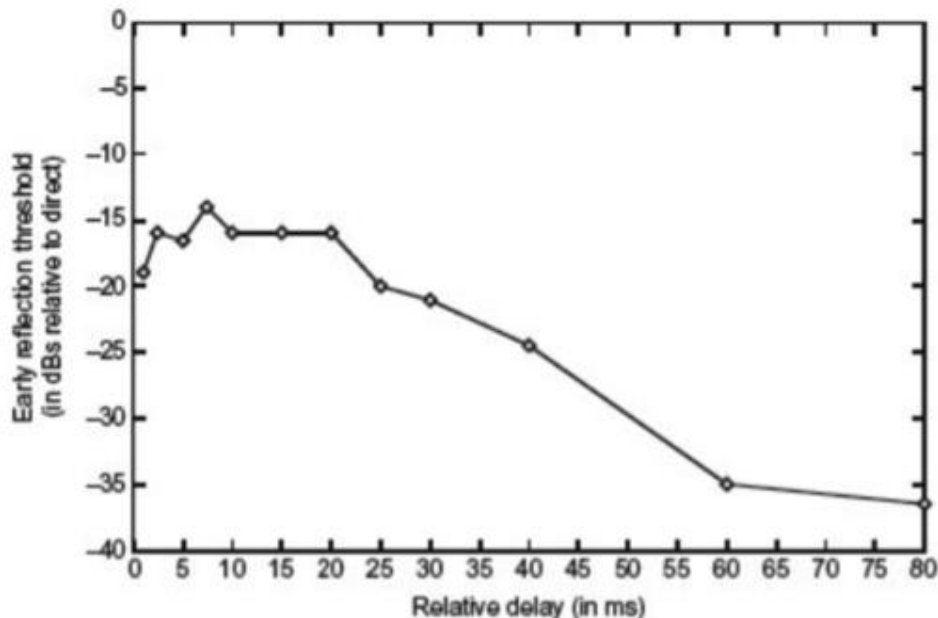
Pour éviter cela, et donner le temps à nos oreilles+cerveau d'analyser les informations enregistrées et créer ainsi l'illusion d'être sur le lieu d'enregistrement, il faut « effacer » les caractéristiques du local d'écoute.

Pour cela, il va falloir atténuer suffisamment l'amplitude (niveau sonore/énergie) des réflexions primaires du local d'écoute, pour qu'elles soient moins perçues que celles enregistrées. Ce qu'on peut schématiser comme ci-dessous :



On verra que pour atténuer l'amplitude des réflexions primaires, on pourra absorber et/ou diffuser ces réflexions en plaçant des panneaux acoustiques aux endroits adéquats.

Et plus précisément, les études réalisées sur ce sujet, ont montré que lorsque l'énergie sonore (pour un signal initial émis à un niveau de référence de 0 dB) évoluait en fonction du temps, dans le local d'écoute, comme la courbe noire ci-dessous, l'atténuation était suffisante pour que les oreilles+cerveau puissent utiliser efficacement les informations enregistrées.





## *Spectre fréquentiel (=réponse amplitude/fréquence) des réflexions*

Mais il y a un deuxième paramètre qui a son importance pour obtenir un résultat qui paraît « naturel » à nos oreilles, car nos oreilles+cerveau se servent aussi du spectre fréquentiel des réflexions pour créer la sensation de l'espace environnant et déterminer la position de la source d'émission des sons.

L'effet Haas<sup>2</sup>, ou effet de précedence, va, en effet, faire que tous les sons réfléchis, qui arrivent dans les 30 à 40ms après le champ direct, seront assimilés comme s'ils venaient du champ direct, **à condition que** leur spectre fréquentiel soit identique ou, au moins, similaire avec celui du champ direct.

Donc, **idéalement, on voudrait que le spectre des réflexions soit identique au champ direct**, pour bénéficier de l'effet Haas, **ET que leur amplitude soit atténuée d'au moins 15dB vs le champ direct**, afin d'avoir l'ITD du lieu d'enregistrement, et pas celui du local d'écoute.

Et si conditions sont remplies, cela rendra d'autant moins important ce qu'il se passe ensuite avec la réverbération résiduelle venant du local d'écoute qui pourra se mélanger plus facilement avec celle du local d'enregistrement, puisque les informations essentielles pour l'illusion auront déjà pu être assimilées et traitées.

En reproduction hifi, ce spectre fréquentiel des réflexions dépend du **spectre émis vers les parois** du local d'écoute (murs, sol, plafond) **ET de l'absorption/diffusion subie sur les matières des parois** et obstacles rencontrés sur le trajet.

On a donc 2 paramètres clés dont dépend ce spectre fréquentiel des réflexions :

- Les caractéristiques d'émission polaire (directivité horizontale et verticale) des enceintes.
- Les caractéristiques du traitement des parois (sol, murs, plafond, objets sur le trajet du son).

Ainsi, des enceintes qui auront une émission polaire large et homogène produiront naturellement des réflexions cohérentes avec le champ direct, mais d'intensité significative qu'il faudra donc atténuer avec le traitement des parois pour tenir la contrainte de l'énergie mentionnée ci-dessus.

---

<sup>2</sup> L'effet Haas est un phénomène démontré, par un scientifique Allemand, Helmut Haas, au début des années 50, qui dit (très schématiquement) que lorsque plusieurs **sons identiques** arrivent successivement à l'oreille, ils sont perçus comme un son unique provenant de l'endroit où a été émis le tout premier son arrivé aux oreilles, du moment que **l'écart temporel entre le premier son et le dernier reste inférieur à 30 ou 40ms environ**.



De même, des enceintes plus directives produiront des réflexions latérales d'intensité moindre (donc moins d'atténuation nécessaire), mais dont le spectre fréquentiel risque d'être non homogène avec le champ direct (les lobes d'émission polaire pouvant montrer une atténuation significative de certaines zones de fréquences).

On comprend donc que, dans tous les cas, il faudra rechercher le bon compromis pour le traitement des parois afin de tenir compte de la nature et de l'intensité des réflexions.

Enfin, on pourrait se demander pourquoi ne pas atténuer totalement les réflexions primaires, puisque les réflexions dont on a besoin sont celles qui ont été enregistrées avec la musique et qui devraient, au moins en théorie, suffire pour créer l'illusion de la performance live.

En pratique, il semble que si l'on fait cela, on court le risque d'avoir une pièce beaucoup trop amortie qui « tue » l'énergie de la musique. Et par ailleurs, les réflexions enregistrées arrivant uniquement via le champ direct (donc provenant uniquement de l'avant) ne peuvent donner l'illusion de provenir des côtés ou de l'arrière comme dans la performance live !

Il semblerait donc que le bon compromis à rechercher soit **une sorte de « greffe » entre la performance enregistrée, via le champ direct** et un ITD suffisant pour nos oreilles+cerveau pour l'intégrer, **et le champ réverbéré de la pièce d'écoute**, rendu **cohérent avec le spectre fréquentiel du champ direct** grâce à un traitement acoustique adapté.

C'est cette « greffe » réussie qui **donnerait la meilleure illusion de la performance « live » enregistrée.**

- Le champ direct donnant les informations principales (timbres, dynamique, etc...), dont la localisation pour la création de l'image,
- Et le champ réverbéré venant renforcer l'ambiance et la crédibilité pour la vie de la musique, sans dénaturer les timbres grâce à sa cohérence fréquentielle avec le champ direct.

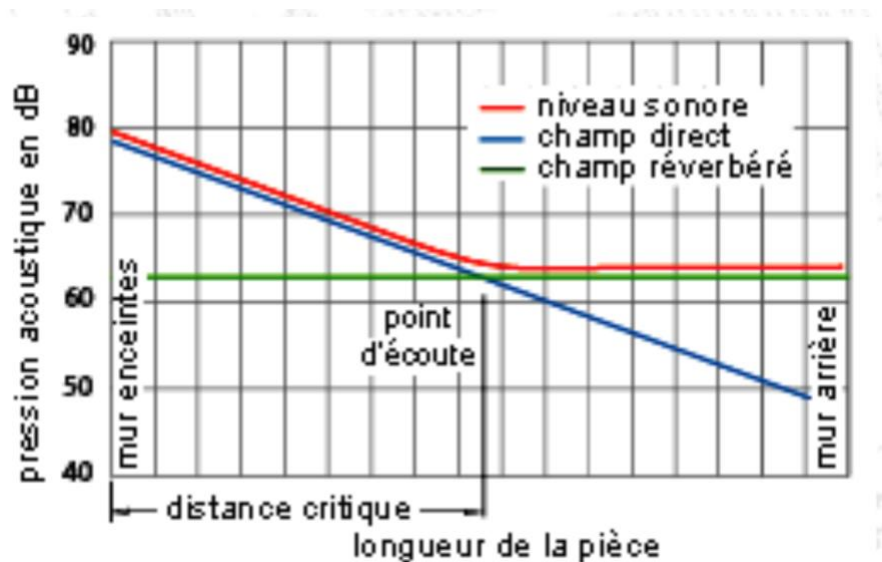


## Distance Critique

On a donc vu que **ce que l'on entend est conditionné par le champ direct et le champ réverbéré**, et comme leurs intensités respectives ne sont pas égales partout dans la pièce d'écoute, la question de la distance « enceintes - sweet spot » à laquelle il est préférable de se positionner est intéressante.

Il semble qu'il y ait un consensus sur ce sujet (c'est assez rare en « audiophilie » pour être noté) pour dire que ce meilleur endroit est proche de ce qu'on appelle la **distance critique**, qui est définie comme l'endroit où l'intensité sonore du champ direct est égale à l'intensité sonore du champ réverbéré.

Le schéma ci-dessous montre l'intensité du champ direct (en bleu) qui décroît en fonction de la distance sweet-spot/enceintes, et qui croise donc l'intensité du champ réverbéré (en vert) à la distance critique.



On observe que si on se place plus près des enceintes que la distance critique, on entend préférentiellement le champ direct, ce qui donnera une image plus précise et focalisée, une meilleure intelligibilité (on comprend mieux les paroles) et lisibilité (on entend mieux les différents registres et instruments), et, plus globalement, cela diminuera l'influence de la pièce d'écoute.

Par contre, on aura une moindre sensation d'espace et d'aération, et l'écoute pourra, à l'extrême, être typée « écoute au casque », ce qui donne un effet « artificiel » à la reproduction.

Et si on se place au-delà de la distance critique, on entendra donc préférentiellement le champ réverbéré, ce qui accentuera l'impression d'espace et d'aération, mais l'image sera moins précise, moins focalisée, moins profonde, la perte d'intelligibilité/lisibilité pourra être significative, et la dynamique sera réduite.

De même, les timbres risquent d'être altérés significativement si le champ réverbéré n'est pas très cohérent fréquemment avec le champ direct.



En pratique, cependant, cela peut être assez difficile de se placer à la distance critique car celle-ci dépend :

- Des dimensions de la pièce d'écoute.
- Des caractéristiques des matériaux des parois (sol, murs, plafond) de la pièce.
- Des caractéristiques de dispersion horizontale et verticale des enceintes.
- Et elle dépend aussi de la fréquence, donc on verra que l'homogénéité de la décroissance de l'énergie à chaque fréquence est aussi un facteur à considérer.

Et lorsqu'on la calcule (voir chapitre suivant), on se rend rapidement compte qu'elle peut être très courte, et donc on est souvent contraint d'être dans le champ réverbéré...

### En résumé, ce qu'on peut retenir :

Ce que nos oreilles+cerveau perçoivent et analysent pour produire l'illusion de la performance musicale, est lié à la conjugaison du champ direct et du champ réverbéré.

- Le champ direct dépend uniquement de la qualité du matériel utilisé (enceintes et électroniques en amont).
- Le champ réverbéré dépend principalement des caractéristiques du local d'écoute.
- Idéalement on essayera de placer le point d'écoute proche de la distance critique des enceintes (intensité du champ direct = intensité du champ réverbéré).
- En dessous de la fréquence de Schröder, « zone modale », ce sont les modes de la pièce qui dominent la restitution.
  - Leurs fréquences dépendent des dimensions de la pièce.
  - Leur intensité dépend des caractéristiques d'extension dans le grave des enceintes.
- Au-dessus de la fréquence de Schröder, « zone réverbérée » on devra se préoccuper :
  - Du délai d'arrivée des premières réflexions et de leur intensité, afin de donner suffisamment de temps aux oreilles+cerveau pour analyser et intégrer les informations du local d'enregistrement.
  - Du spectre fréquentiel des réflexions primaires et du champ réverbéré, qui dépend des caractéristiques du local d'écoute et de la dispersion polaire des enceintes, et qui doit être cohérent avec le spectre fréquentiel du champ direct.



## ET ÇA DONNE QUOI AVEC LE VOCABULAIRE DES « AUDIOPHILES » ?

Les notions abordées ci-dessus donnent quelques principes sur la façon dont nos oreilles+cerveau perçoivent, et analysent, les phénomènes physiques acoustiques à l'œuvre dans notre local d'écoute, pour récréer l'illusion de la performance musicale enregistrée. Et on voit bien qu'il y a un ensemble de difficultés à gérer si l'on veut permettre au système hifi de remplir son rôle au mieux de ses possibilités.

Si l'on reprend ces difficultés une par une, on peut essayer d'exprimer avec le vocabulaire audiophile ce qu'elles signifient « à l'écoute », et, ainsi, commencer à rapprocher les critères « audiophiles » des paramètres « acoustiques ».

*Les devises Shadok*



EN ESSAYANT CONTINUUELLEMENT  
ON FINIT PAR RÉUSSIR. DONC :  
PLUS ÇA RATE, PLUS ON A  
DE CHANCES QUE ÇA MARCHE.

### La pensée du jour

**Que les audiophiles qui aiment changer de matériel se rassurent : On n'oubliera pas que le choix du matériel (électronique et enceintes, etc...) est un paramètre très important, puisqu'il est évident qu'il conditionne totalement le champ direct. Donc si ce matériel est de faible qualité, il est certain que la qualité obtenue sera de faible qualité également !**

Donc une fois le système choisi et installé, que se passe-t-il lors de l'interaction avec le local d'écoute ?

### Dans la zone modale :

**Les pics et creux d'amplitude** liés aux ondes stationnaires **vont affecter les timbres** par un effet de prééminence de certaines fréquences, et la quasi disparition de certaines autres.

De plus, **le trainage**, va faire durer ces fréquences plus longtemps que nécessaire, et cela va se traduire par **un grave caoutchouteux, lent, enflé, monocorde, peu lisible, avec peu ou pas d'articulation**, et lorsque ces modes touchent la zone 80-140Hz (ce qui est fréquent dans des pièces de taille normale/modeste), on aura aussi **un bas médium qui va perdre en lisibilité et intelligibilité des voix**, du fait d'un effet de masque.



Ainsi, suivant le nombre et l'ampleur des fréquences modales affectées, les contrebasses pourront paraître monocordes, peu lisibles, et on suivra avec difficulté le jeu de l'interprète.

De même, les percussions pourront paraître lentes, parfois enflées/exagérées, mais jamais très nettes et incisives. Et l'effet « boom boom » qu'on trouve assez fréquemment dans le grave, est généralement lié à des modes non gérés.

**L'impression générale**, au-delà de la perte de lisibilité, est aussi **une perte de dynamique** (micro et macro) de la musique.

De fait, **le trainage induit une sorte de compression de la dynamique**, car en empêchant les sons de s'atténuer rapidement, il remonte mécaniquement le niveau sonore moyen et donc réduit les contrastes, masque les micro-détails et donc tue la vie de la musique !

### Dans la zone réverbérée :

Lorsque l'**ITD est trop court et l'énergie sonore des réflexions est trop élevée** (au-dessus de la courbe indiquée plus haut), un premier symptôme est l'**absence de profondeur de l'image et cela peut même aller jusqu'à l'absence d'image stable**, avec comme corolaire la localisation très facile de chaque enceinte (alors qu'elles devraient être invisibles acoustiquement).

**Il devient alors difficile de distinguer le lieu d'enregistrement**, car c'est le **local d'écoute qu'on entend de façon systématique** sur tous les enregistrements, c'est-à-dire, **une coloration !**

Un 2ème symptôme, qui arrive lorsque l'énergie sonore ne s'atténue pas suffisamment vite (reste au-dessus de la courbe après 30 ou 40ms), est l'**impression d'un aigu trop brillant et/ou « agressif »**, qu'on attribue parfois au « numérique » mais qui est, fréquemment, lié à un amortissement insuffisant des aigus dans la pièce.

Par ailleurs, lorsque **le spectre fréquentiel des réflexions n'est pas cohérent avec celui du champ direct**, on observe **une altération des timbres** avec une **perte de naturel**, et **un côté systématique/coloration** sur toutes les musiques, qui va dépendre des zones de fréquences concernées.

Enfin, comme indiqué précédemment, **si la distance du sweet spot aux enceintes, est trop différente de la distance critique**, on aura :

- **Lorsqu'on est trop près des enceintes**, une reproduction propre et nette, une bonne image, mais qui peut sembler artificielle, un peu « mécanique » et qui manque d'aération, et,
- **Lorsqu'on est trop loin des enceintes**, une reproduction manquant de lisibilité et d'intelligibilité, une image un peu floue, qui peut être tassée entre les enceintes, qui manque de profondeur, et une compression de la dynamique.



Toutes ces considérations sont évidemment des impressions subjectives qui peuvent être plus ou moins marquées suivant l'ampleur de chaque problème acoustique, mais elles sont représentatives de chacune des difficultés rencontrées, et chaque amélioration apportée sur chaque problème est immédiatement et facilement audible.

Par contre, lorsqu'on entreprend d'essayer de traiter ces problèmes acoustiques, l'efficacité de ce qu'on met en place, n'est pas toujours évidente à bien évaluer, car si on se contente de l'exprimer en termes « audiophiles », on ne dispose pas d'une échelle objective et répétable, mais seulement d'appréciations subjectives.

Et de plus, lorsqu'on perçoit une amélioration, comment savoir si on est l'optimum possible dans cette pièce ? Quels sont vraiment les critères qui ont progressé ? Et quelques temps plus tard, n'a-t-on pas parfois l'impression d'avoir finalement un peu perdu sur d'autres aspects sans s'en être rendu compte ?

Tous ceux qui ont essayé de mettre un traitement acoustique dans leur pièce hifi, se sont sûrement déjà posé ces questions...

Et c'est là qu'il peut être intéressant de regarder ce que les paramètres « acoustiques » peuvent apporter.



## ET LES PARAMETRES ACOUSTIQUES ?

De la même façon qu'on peut évaluer les difficultés acoustiques en termes « audiophiles » subjectifs, à partir de ce que l'on entend, on peut évaluer ces mêmes difficultés acoustiques avec un certain nombre de paramètres chiffrés objectifs, obtenus par la mesure.

Comme indiqué précédemment, il ne sera pas possible de mesurer les timbres, la dynamique, ou encore l'image, mais par contre, on va pouvoir évaluer les fréquences et l'amplitude des modes, la durée de l'amortissement par fréquence, la décroissance de l'énergie au fil du temps, le spectre fréquentiel des réflexions, calculer la fréquence de Schröder, la distance critique, etc...

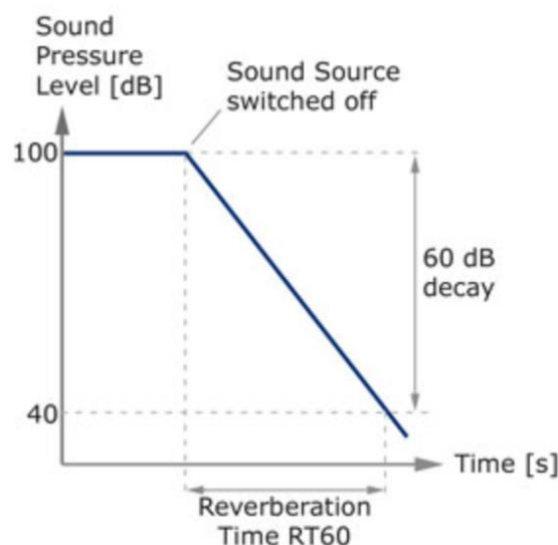
Donc finalement, on va pouvoir se faire une idée « objective » des paramètres qui ont une influence sur la façon dont nos oreilles+cerveau perçoivent et analysent ce qu'on entend pour créer l'illusion de la performance enregistrée. Et comme on va pouvoir les comparer avec une cible idéale théorique pour chacun d'entre eux, on pourra évaluer le potentiel réel d'amélioration et déterminer ainsi les solutions possibles à mettre en œuvre de façon très pragmatique.

Mais avant de détailler un peu plus les différentes mesures qu'on pourra utiliser, il faut commencer par bien comprendre **la notion de RT60** car c'est un paramètre clé pour caractériser le local d'écoute, et il sert de base de calcul pour plusieurs autres paramètres.

### RT60 définition et utilisation :

Le **RT60** est le temps (exprimé en secondes) que met un son pour s'atténuer de 60dB après son émission, dans un local clos. Le sigle RT60 est issu de l'abréviation de **Temps de Réverbération** (TR ou RT en anglais) pour une atténuation de **60dB**.

*Illustration ci-dessous :*



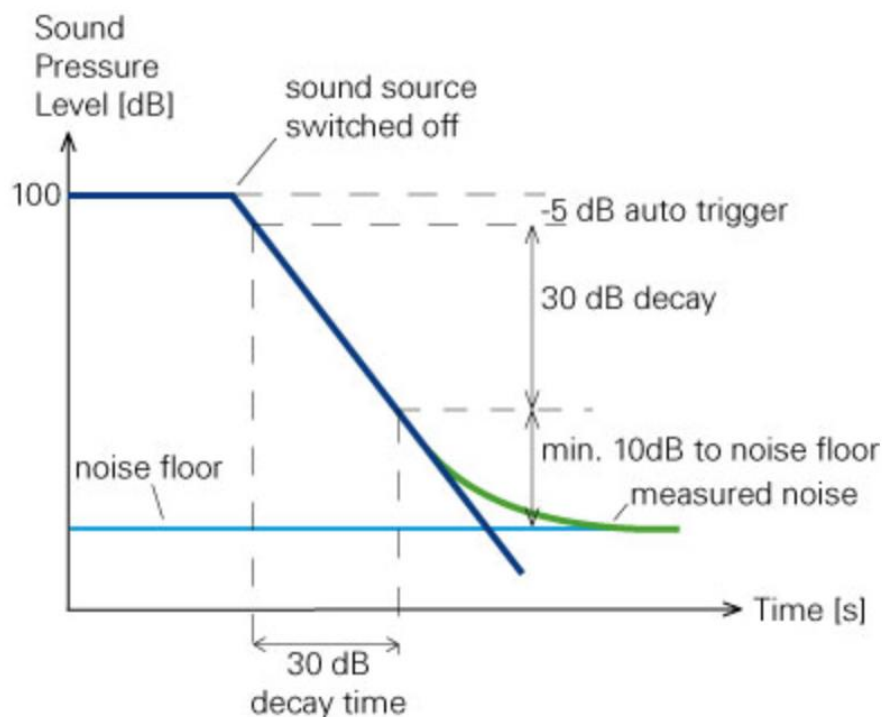


Mais, en réalité, il est techniquement impossible de mesurer directement le RT60 dans une pièce d'habitation pour au moins 2 raisons.

- La première c'est que le niveau de bruit ambiant, même dans une pièce silencieuse est aux environs de 30 à 40dB, et donc pour qu'un son s'atténue de 60dB, il faudrait déjà qu'il parte de plus de 100dB ce qui n'est pas recommandable pour la santé de nos oreilles.
- La deuxième c'est une question de définition même du RT60 qui exige un champ sonore diffus homogène, alors que dans une pièce d'habitation, dans la zone « modale » (dans le grave), les ondes stationnaires qui se développent sont le contraire d'un champ diffus et rendent donc indéfini la notion de RT.

Mais fort heureusement, en pratique, on peut quand même estimer le RT60 à partir de la pente de décroissance de la pression sonore. On définit ainsi le T20 et le T30, qui sont des estimations du RT60 sur une atténuation de 20dB et 30dB respectivement. On a alors :

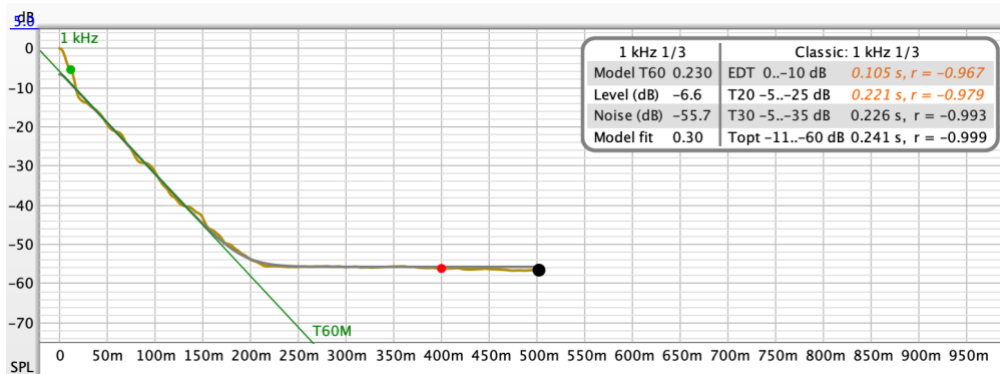
- $RT60(T20) = 3 * (\text{temps de décroissance de } 20 \text{ dB})$
- $RT60(T30) = 2 * (\text{temps de décroissance de } 30 \text{ dB})$  – voir illustration ci-dessous.





De plus, REW effectue aussi un calcul plus élaboré, adapté aux pièces domestiques de dimensions « normales », appelé Topt, afin de donner une estimation du RT60 plus « réaliste ». Et il fournit évidemment aussi le T20 (calculé entre -5dB et -25dB) et le T30 (calculé entre -5dB et -35dB).

Ci-dessous une illustration d'un calcul de régression linéaire effectué par REW pour le RT60 à 1Khz.



Pour ceux que la méthode de calcul du RT60 par REW intéresse, on peut se référer à la documentation sur le lien suivant : ([https://www.roomeqwizard.com/help/help\\_en-GB/html/graph\\_rt60.html#top](https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/graph_rt60.html#top)). Ces calculs sont effectués selon les recommandations de la norme ISO3382, et REW fournit un tableau détaillé (voir exemple ci-dessous) :

ISO 3382 parameters												
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
EDT (s)	1.718	1.339	0.666	0.477	0.430	0.511	0.490	0.979	0.508	0.539	0.975	0.590
T20 (s)	0.741	0.834	0.597	0.617	0.751	0.868	0.876	0.663	0.738	0.663	0.637	0.857
T30 (s)	0.776	0.826	0.903	0.785	0.761	0.849	0.841	0.759	0.733	0.733	0.649	0.833
Topt (s)	0.754	0.875	0.883	0.776	0.718	0.762	0.792	0.786	0.733	0.761	0.680	0.781
T60M (s)	0.669	0.767	0.966	0.786	0.733	0.757	0.796	0.783	0.725	0.741	0.660	0.806
C50 (dB)	-49.73	-19.53	-8.23	0.01	0.34	4.72	7.23	3.23	3.61	0.90	1.81	-0.05
C80 (dB)	-15.72	-5.87	2.92	10.91	9.73	7.63	7.76	4.80	8.21	7.94	4.31	8.35
D50 (%)	0.0	1.1	13.1	50.1	52.0	74.8	84.1	67.8	69.7	55.2	60.3	49.7
TS (s)	0.167	0.111	0.065	0.047	0.051	0.046	0.046	0.055	0.043	0.055	0.058	0.049
	800	1,000	1,250	1,600	2,000	2,500	3,150	4,000	5,000	6,300	8,000	10,000
EDT (s)	0.758	0.844	0.681	0.620	0.626	0.680	0.704	0.589	0.663	0.539	0.500	0.459
T20 (s)	0.851	0.798	0.750	0.780	0.800	0.800	0.764	0.718	0.681	0.613	0.535	0.461
T30 (s)	0.842	0.802	0.845	0.799	0.812	0.814	0.761	0.731	0.691	0.622	0.552	0.479
Topt (s)	0.835	0.858	0.865	0.867	0.819	0.822	0.769	0.734	0.679	0.624	0.555	0.496
T60M (s)	0.826	0.813	0.855	0.803	0.814	0.809	0.759	0.740	0.700	0.617	0.543	0.467
C50 (dB)	5.75	2.39	4.28	5.63	6.28	4.96	5.33	6.17	7.05	7.70	9.10	9.87
C80 (dB)	9.74	4.95	7.49	9.41	9.74	8.72	8.69	9.19	9.46	10.56	12.65	13.58
D50 (%)	79.0	63.4	72.8	78.5	80.9	75.8	77.3	80.5	83.5	85.5	89.0	90.7
TS (s)	0.027	0.047	0.039	0.030	0.029	0.031	0.031	0.029	0.025	0.023	0.017	0.013

En pratique pour l'analyse acoustique qui nous intéresse, on n'aura pas besoin de ces tableaux, ni de la totalité des paramètres ci-dessus.

Par contre on va s'intéresser au RT60 (Topt, T20 et T30) et à sa stabilité sur le spectre fréquentiel (50Hz-10000Hz) car, comme on peut le voir sur le tableau ci-dessus, REW calcule un RT60 pour chaque fréquence (en fait par zone de 1/3 d'octave). En effet, l'atténuation de la pression sonore peut être différente selon la façon dont les réflexions interfèrent avec le champ direct et/ou avec les traitements acoustiques dans le local d'écoute, et ce sera donc un indicateur intéressant.



Plus généralement, le RT60 est, en quelque sorte, **le reflet de l'acoustique générale du local d'écoute**, on peut ainsi définir un RT60 « idéal » d'une pièce destinée à accueillir un système stéréo.

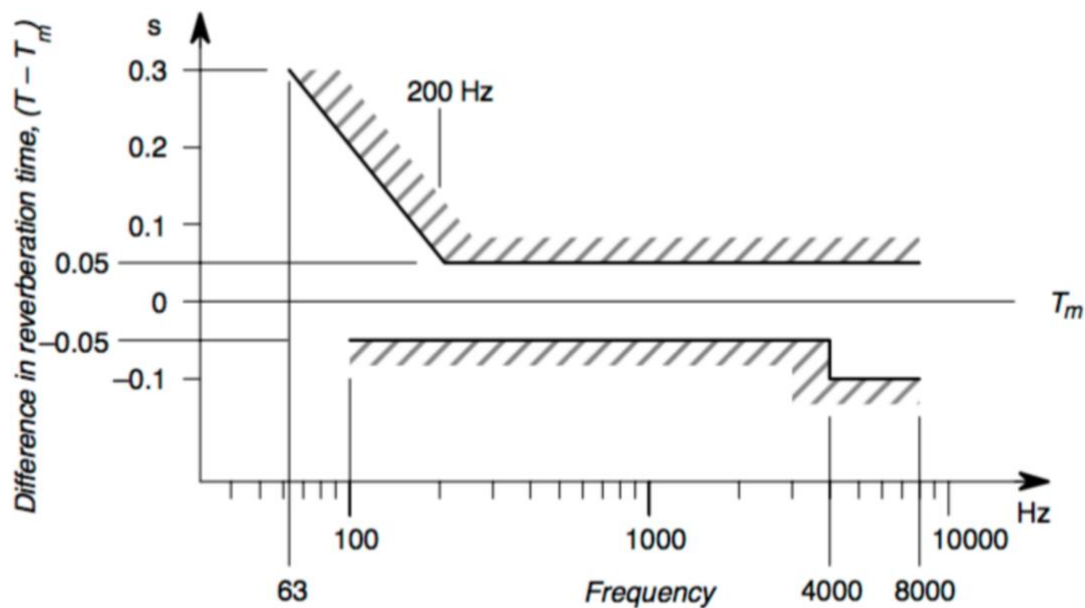
### *RT60 « idéal » ou cible*

La « littérature » indique que pour un système stéréo, le **RT60 devrait être idéalement situé entre 0.20s minimum et 0.50s maximum**. En dessous la pièce va manquer de vie car trop amortie, et au-dessus elle sera trop brillante, va perdre en intelligibilité et va également compresser la dynamique de la musique.

En fait, on peut affiner la **cible « idéale » du RT60, pour une utilisation hifi stéréo**, car on peut l'exprimer en fonction de la taille de la pièce, et utiliser la formule suivante<sup>3</sup> :

$$\text{RT60} = T_m = 0.30 \times \sqrt[3]{\frac{V}{100}}, \text{ où } V \text{ est le volume de la pièce en m}^3.$$

De plus, **la régularité du RT60** en fonction de la fréquence est un critère presque plus important que sa valeur absolue car cette régularité est **un des indicateurs d'une réverbération cohérente/homogène avec le champ direct**. En pratique, on pourra utiliser l'abaque ci-dessous pour s'assurer de cette régularité.



**Fig. 1 – Tolerance limits for reverberation time.**

<sup>3</sup> Cette formule donne une cible « idéale » inférieure à 0.20s pour les très petites pièces (<30m<sup>3</sup>), ce qui sera probablement trop amortie, et donc, dans ce cas, on visera surtout de rentrer dans l'abaque cible qui tolère 0.05s supplémentaires.

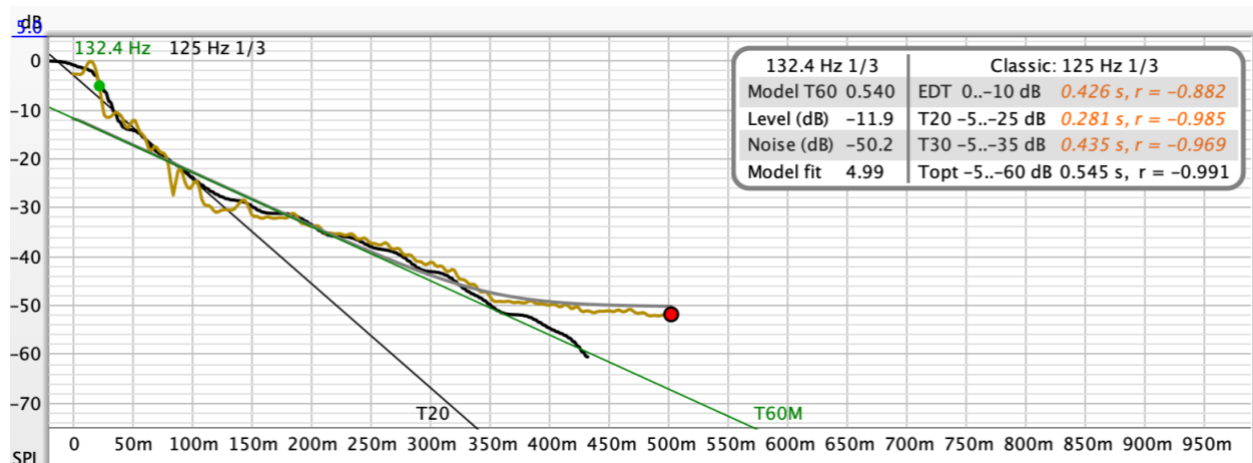


De la même façon, on pourra regarder la cohérence du RT60 (Topt) avec le T20 et le T30, sur ce même abaque, car c'est un indicateur de la régularité de la pente de décroissance de la pression sonore, et donc indirectement de l'homogénéité du champ réverbéré avec le champ direct.

Idéalement, il faudrait avoir  $RT60=T20=T30$ , mais c'est très difficile à obtenir en pratique...

Ainsi, selon Acoustic Frontiers ([acoustic standards](#)), on pourra accepter un écart entre ces 3 valeurs de + ou -25% sur la bande de fréquences 250Hz-4000Hz.

*Et ci-dessous un exemple d'écart significatif entre T20 et Topt (ici à 132Hz).*



Par ailleurs, le **RT60** va nous permettre de calculer la **distance critique**, ainsi que la **fréquence de Schröder** (qui sépare la zone « modale » de la zone « réverbérée »).



## Calcul de la Distance Critique

On peut avoir une idée approximative de la distance critique en utilisant le calculateur disponible sur le site suivant : [http://www.akustar.com/dossiers/494\\_distcrit.htm](http://www.akustar.com/dossiers/494_distcrit.htm)

Il faudra estimer les caractéristiques de dispersion horizontale et verticale en regardant la documentation de ses enceintes, ou bien en prenant une valeur « standard » (par exemple 90° en horizontal et 60° ou 70° en vertical), et en utilisant le RT60 mesuré avec REW (et/ou le RT60 cible pour sa pièce).

On peut facilement simuler avec diverses valeurs pour voir comment évolue cette distance en fonction des paramètres. Mais on va vite se rendre compte que même dans une pièce de dimensions « correctes » (5.2m, 4m, 2.5m), partiellement traitée (RT60 à 0.50s), pour peu qu'on ait des enceintes avec une dispersion polaire correcte (100° horizontal et 80° vertical), cette distance est de seulement 1.58m, ce qui est très proche des enceintes, et peu utilisable en pratique.

**Dimensions de la pièce**

Longueur  Largeur  Hauteur  m

Entrez les dimensions en mètres.  
Séparez les décimales avec un **point** plutôt qu'une virgule.

**Temps de réverbération de la pièce à 2kHz**  
(essayez différentes valeurs).

secondes

**Caractéristiques polaires de l'enceinte**

Dispersion horizontale	Dispersion verticale	Coefficient de sélectivité
Entrez une valeur en degrés.	Entrez une valeur en degrés	Ne rien entrer ici
<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="80"/>	Q: <input type="text" value="6.1"/>

Lancer le calcul

**Résultats**

**Distance critique**

Pour un orateur (voix humaine non amplifiée)	Pour l'enceinte référéncée ci-dessus
<input type="text" value="0.91"/> mètres	<input type="text" value="1.58"/> mètres

Et donc, pour obtenir une distance critique « utilisable », il faudra souvent :

- Traiter correctement la pièce (RT60 proche de la cible « idéale »),
- Avoir des enceintes avec une dispersion polaire cohérente avec les dimensions de la pièce,
- Ou bien disposer d'une grande pièce,
- Et si possible de cocher ces 3 conditions en même temps !



### *Calcul de la fréquence de Schröder*

Enfin, on peut utiliser le RT60 pour estimer **la fréquence de Schröder** avec la formule suivante :  $F_s = 2000 \times \sqrt{Tm/V}$  où V est le volume de la pièce en m<sup>3</sup>.

On voit donc que plus le RT60 est élevé et la pièce petite, plus la fréquence de Schröder va être élevée et donc la zone modale va être étendue.

Exemples :

- Pour un RT60=0.80s, et un volume pièce=60m<sup>3</sup>, on aura Fs=230Hz.
- Pour un RT60=0.25s, et un volume pièce=46m<sup>3</sup>, on aura Fs=147Hz.
- Pour un RT60=0.35s, et un volume pièce=120m<sup>3</sup>, on aura Fs=108Hz.

Ces valeurs sont indicatives et montrent seulement l'intérêt d'avoir un volume important (grande pièce) et un RT60 dans la zone « idéale » car cela réduit la taille de la zone modale et donc le nombre de problèmes potentiels dans cette bande de fréquences qui est, hélas, la plus difficile à traiter acoustiquement...



## Quelles sont les mesures utiles pour mettre au point son système ?

En pratique, on peut, schématiquement, classer les mesures qu'on va pouvoir réaliser en 3 catégories distinctes :

- A. Les mesures intrinsèques aux enceintes (c'est à dire, qui ne dépendent que des caractéristiques de l'enceinte (géométrie, filtre, HPs, etc.)).
- B. Les mesures qui ne dépendent que de la pièce où le système est installé (dimensions, matériaux, ameublement, traitement acoustique, etc.).
- C. Les mesures qui représentent l'interaction entre le système et le local où il est installé.

Il me paraît important de bien comprendre chacune de ces mesures car les actions que l'on pourra mener pour améliorer le système seront de nature très différente selon que la cause du « problème » vient des enceintes, de la pièce ou de l'interaction entre les deux.

### *A. Mesures intrinsèques aux enceintes :*

La plus connue est certainement **la réponse amplitude/fréquence** car c'est celle que publient fréquemment les journaux et autres documentations techniques. Mais comme elle est souvent mesurée en chambre anéchoïque, elle n'a que peu d'utilité pour nous, puisque nos locaux, même lorsqu'ils sont dédiés, ne sont pas comparables à ce type d'environnement.

On ne pourra donc mesurer que la réponse amplitude/fréquence dans le local considéré, et donc j'y reviendrai dans la partie C ci-dessous.

La mesure<sup>4</sup> intrinsèque aux enceintes qui me paraît être la plus importante est la **Phase**. C'est ce paramètre qui indique l'alignement temporel des différents HP de l'enceinte, et il fait partie des critères essentiels pour l'obtention d'une bonne image en 3 dimensions.

En pratique, c'est malheureusement le paramètre le plus difficile à mesurer car il est perturbé par les multiples réflexions du local, et d'autre part, c'est un paramètre sur lequel on ne peut pas faire grand-chose, à moins de mettre en œuvre un logiciel de correction numérique (RePhase, Dirac, Trinnov, HAF, Acourate, ...), ou, plus radical, choisir ses enceintes en connaissance de cause (certaines étant mieux conçues que d'autres sur ce paramètre).

De fait, on mesure aussi en même temps, la **Réponse Impulsionnelle**, le **STEP** et le **délai de groupe (Group Delay)** qui montrent le comportement des différents HP qui composent l'enceinte. Ces mesures (Impulsion, STEP, Group Delay) ne sont, d'une certaine façon, qu'une autre représentation de la phase. Et tout comme la phase, on

---

<sup>4</sup> On ne parle ici que de mesures acoustiques et donc pas de mesure d'impédance, de rendement, etc.... qui n'ont pas d'intérêt ici



n'y pourra pas grand-chose, mais leur analyse sera intéressante, et plus facile que la phase, notamment, dans le cadre de la mise en œuvre d'une correction numérique.

### *B. Mesures qui dépendent du local/pièce d'écoute :*

Le premier paramètre facile à mesurer de cette catégorie est le **RT60** qui a été détaillé longuement dans le chapitre précédent.

Le deuxième paramètre qu'on va pouvoir mesurer est lié aux **modes** créés par les **ondes stationnaires**. On va pouvoir **identifier les fréquences qui posent problème**, et observer leur comportement sous différents angles de vue.

On notera que si les fréquences modales ne dépendent que des dimensions géométriques du local d'écoute, leur amplitude dépend aussi de la capacité des enceintes à produire ces fréquences (i.e. de leur réponse amplitude/fréquence dans le grave).

### *C. Mesures qui représentent l'interaction entre le système et le local :*

Finalement ce sont celles-là qu'on va mesurer le plus facilement et qui sont les plus cohérentes avec ce qu'on entend car elles représentent la somme de tout ce qui nous arrive aux oreilles. On va trouver ici :

La **courbe de Réponse Amplitude/Fréquence** qui est la plus facile à comprendre et sûrement la plus utile au début de la mise au point du système.

L'**ETC** (Energy Time Curve) qui va permettre de voir l'influence des réflexions primaires et tardives dues au local, ainsi que la cohérence du champ réverbéré avec le champ direct dans les 40 premières millisecondes.

Le **Waterfall**, le **Decay** et le **Spectrogram** qui sont trois représentations graphiques de l'influence du local sur la courbe amplitude/fréquence dans le temps. Il y en a 3 pour un même phénomène car aucune n'est pleinement satisfaisante pour le représenter complètement. Il est donc pratique de pouvoir l'observer sous 3 angles différents, chacun rendant plus lisible un aspect particulier.

Le Waterfall est une représentation graphique en 3D de l'évolution de la courbe amplitude/fréquence qui est « visuellement parlante », mais peu pratique si l'on veut se fixer des objectifs/limites à viser.

Techniquement, on peut considérer que le Spectrogram est la vision du Waterfall vu de dessus, alors que le Decay est la vision du Waterfall vu de face.

Ces éléments permettront de voir le comportement dans la zone modale (fréquences, amplitude, trainage), mais aussi dans la zone réverbérée (cohérence champ réverbéré avec champ direct au-delà de 40ms, trainage).



## Mais quel est le lien avec ce qu'on entend ?

De la même façon qu'on peut exprimer en termes « audiophile », les difficultés acoustiques rencontrées et leur influence sur notre perception oreilles/cerveau, on peut aussi qualifier/mesurer « objectivement » ces difficultés.

Donc une fois le système choisi et installé, que peut-on « voir » de l'interaction avec le local d'écoute ?

### Dans la zone modale :

On a vu que dans cette zone les 2 principaux problèmes étaient les fréquences modales (pics et creux d'amplitude) et le trainage (atténuation trop lente de l'amplitude).

- On va pouvoir **identifier précisément toutes les fréquences modales ainsi que leur amplitude**. Ces informations seront très facilement visibles avec la courbe de **réponse amplitude/fréquence**.
- Et on pourra également **mesurer/visualiser** l'ampleur du **trainage** sur l'ensemble du spectre et, en particulier, aux fréquences modales, grâce au **Spectrogram** et au **Decay**.

### Dans la zone réverbérée :

On a vu que dans cette zone les principaux problèmes étaient liés aux délais et amplitudes des réflexions primaires et tardives, ainsi qu'à leur cohérence fréquentielle avec le champ direct.

- On va pouvoir visualiser le **décalage d'arrivée des réflexions primaires et tardives (réverbération), ainsi que leur amplitude**, avec l'**ETC**.
  - Ce qui va permettre de mesurer le niveau d'impact du local d'écoute vs le champ direct pour la création de l'image.
- On va aussi pouvoir évaluer la **cohérence du spectre fréquentiel des réflexions avec le champ direct**. Plusieurs indicateurs seront utiles pour cela :
  - Le **RT60** et sa stabilité, qui donneront une idée du niveau sonore des réflexions et de leur cohérence spectrale.
  - Le **Decay** qui permettra de visualiser la cohérence spectrale et d'identifier les anomalies éventuelles sur le spectre. Il sera très utile pour toute ce qui se passe **après les 40 premières millisecondes**.



- Pour voir ce qu'il se passe **dans les 40 premières millisecondes**, on pourra utiliser l'**ETC** en regardant la décroissance de l'énergie sonore sur plusieurs zones de fréquences (par octave ou 1/3 d'octave par exemple).

On voit donc bien que si on n'a aucune information directe sur les critères audiophiles, on a quand même une information directe et chiffrée des paramètres qui les conditionnent.

Et cette identification des difficultés acoustiques rencontrées, permettra ensuite de définir, de façon pragmatique et concrète, un traitement passif et/ou une correction numérique adaptés, qui amélioreront également les critères audiophiles, et donc la performance du système !



## Comment réaliser ces mesures ?

La lecture du Tutoriel REW est indispensable, sauf si vous êtes déjà familier de ce logiciel.

On peut le télécharger là : [Tutoriel REW](#) ou là : [Tutoriel REW](#)

REW est un logiciel remarquable mais plutôt complexe et il demande un peu de pratique pour se familiariser avec lui.

Il est, à mon avis, essentiel de commencer par le paramétrer correctement car, sans cela, les affichages obtenus semblent être à des années lumières des graphes présentés ici, alors qu'il ne s'agit que d'un simple ajustement des échelles et des unités d'affichage choisies.

L'Annexe 2 : Réglages affichages graphes de REW, donne le paramétrage que j'utilise si l'on veut retrouver les mêmes affichages que dans ce document.

Les mesures que je recommande sont le fruit de mon expérience personnelle sur mon système et les quelques autres que j'ai pu mesurer chez des amis audiophiles.

Elles n'ont aucune prétention d'universalité ou de vérité quelconque, et il est tout à fait possible de faire autrement ou d'utiliser d'autres mesures ou paramètres ou logiciels.

Par contre, il y a une logique à procéder ainsi, et les informations que l'on peut en retirer permettent de définir un plan d'amélioration cohérent qui sera évidemment mesurable, mais surtout grandement audible, ce qui est bien entendu l'essentiel !



### *Quelques recommandations préalables :*

Les mesures étant dépendantes de la pièce et du système, il est évident que chaque changement de position des enceintes, ou de quoi que ce soit dans la pièce va avoir un impact plus ou moins significatif.

De plus, l'emplacement du micro fait varier la mesure d'amplitude/fréquence de façon importante, en apparence tout du moins, ce qui peut paraître déroutant au début, mais en fait, ça n'est pas très significatif car ce qui compte vraiment c'est la moyenne de quelques mesures autour du sweet-spot, et cette moyenne est par contre très stable et très répétable dans le temps, et est donc très significative et utile pour l'analyse.

Ma recommandation est donc de procéder par étapes.

- 1) On va d'abord positionner les enceintes au mieux. Pour cela, le mieux est probablement de partir de la recommandation du constructeur (ou de celle qu'on veut), et on mesure au sweet-spot la voie droite et la voie gauche séparément.
- 2) Ensuite, on déplace les enceintes et/ou le sweet-spot, jusqu'à ce qu'on ait trouvé le meilleur (ou le moins mauvais endroit) pour la courbe de réponse amplitude/fréquence. On peut utiliser la moyenne des 2 mesures droite et gauche, ou la somme  $A+B$  des 2 mesures, pour se faire une première idée globale.
- 3) Une fois les enceintes positionnées au mieux, le sweet-spot choisi, et tous les éléments de traitement passifs éventuels installés, on pourra procéder aux mesures servant au diagnostic acoustique proprement dit.

Enfin pour le kit de mesures utiles au diagnostic acoustique, le plus efficace et rapide, est d'utiliser la méthode des 9 mesures telles qu'indiquée dans le Tutoriel REW.



## Analyser son bilan acoustique

Finalement, le plus difficile ce n'est pas tant les mesures à réaliser que de savoir quel résultat il faut chercher à obtenir !

Et plus important, peut-être, qu'est-ce qu'il est réaliste de pouvoir obtenir chez soi ? En d'autres termes, quand peut-on considérer qu'on a atteint le maximum possible dans sa pièce avec son système ?

Je ne crois pas qu'il existe une réponse unique et universelle à ces questions, mais par contre, il y a quelques grandes règles qui méritent un peu d'attention, et qui lorsqu'elles sont appliquées donnent un résultat, selon mon expérience, plutôt très probant.

En tous cas, j'ai pu constater que chaque changement qui permet une amélioration sur les paramètres clés, est parfaitement audible, et est un progrès dont il est ensuite impossible de se passer.

Les critères que je décris ci-dessous sont bien documentés dans les publications suivantes disponibles sur internet (références en [Annexe 3](#)), et je conseille leur lecture.

[http://www.acousticfrontiers.com/wp-content/uploads/2011/10/acoustic\\_measurement\\_standards.pdf](http://www.acousticfrontiers.com/wp-content/uploads/2011/10/acoustic_measurement_standards.pdf)

<https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>

<https://www.edn.com/acoustics-and-psychoacoustics-applied-part-1-listening-room-design/>

On retrouve aussi ces critères dans plusieurs autres articles sur internet, parfois avec des infos contradictoires, mais globalement il me semble y avoir plus d'avis convergents que divergents sur le sujet.

Ce que je propose ci-dessous est ma propre interprétation de ce qui « compte » vraiment pour installer son système.

Ça reste évidemment un avis subjectif et chacun pourra expérimenter chez soi pour se faire sa propre opinion.



## QUELLES MESURES ANALYSER ?

Les mesures qu'on va analyser sont celles citées précédemment, et pour lesquelles on va définir des objectifs, soit donc :

- Le **RT60** qui donne une indication globale du comportement de la pièce.
- La **courbe de réponse amplitude/fréquence**. C'est le paramètre le plus connu car il est le plus facile à comprendre<sup>5</sup> et c'est, notamment, le bon indicateur pour le placement initial des enceintes.
- Le **Spectrogram** et le **Decay**. Ces paramètres sont essentiels pour identifier les problèmes « temporels » induits par l'interaction pièce/enceintes.
- L'**ETC** qui permet de visualiser les réflexions primaires et tardives et donc d'identifier les sources potentielles de problèmes, et d'aider au positionnement des traitements passifs éventuels.
- La **réponse impulsionnelle** (Impulse), le **STEP** et la **Phase**, qui servent à visualiser le comportement intrinsèque de l'enceinte. Leur analyse est surtout utile pour la mise en œuvre d'une correction numérique avec RePhase, mais elle peut aussi mettre en évidence des problèmes des branchements incorrects entre les différents HPs et parfois entre les voies gauche et droite<sup>6</sup>.

## QUELS OBJECTIFS POUR CHAQUE TYPE DE MESURE ?

Pour chacune des mesures qu'on va réaliser, on peut définir une cible théorique idéale = une « référence », dont on devrait essayer de se rapprocher le plus possible afin de neutraliser, ou au moins réduire, l'impact de l'environnement (pièce) sur la performance du système.

Ces références ne sont pas évidemment pas un dogme absolu sans lequel point de musique possible, mais par contre, on constate facilement que tout progrès vers cette référence est facilement audible, et est en général très bénéfique.

Dans tous les cas, on pourra visualiser l'écart entre son environnement acoustique et celui qu'on pourrait souhaiter avoir pour bénéficier de tout le potentiel de son système hifi, et s'en servir ensuite pour déterminer un plan éventuel d'actions correctives, dont on pourra aussi mesurer concrètement l'efficacité.

---

<sup>5</sup> La courbe Amplitude/Fréquence est parfois publiée par les fabricants d'enceintes, même si, dans ces publications, on connaît rarement les conditions de mesures et que la courbe amplitude/fréquence n'est pas vraiment significative dans l'absolu puisqu'elle n'est vraiment pertinente que dans le local où sont installées les enceintes.

<sup>6</sup> J'ai déjà rencontré au moins 3 cas concrets d'enceintes du commerce (pourtant de marques réputées) avec des HPs branchés à l'envers entre les 2 enceintes, et sans la mesure, il aurait été difficile d'identifier le problème car la différence à l'oreille est très subtile surtout quand il s'agit du tweeter...



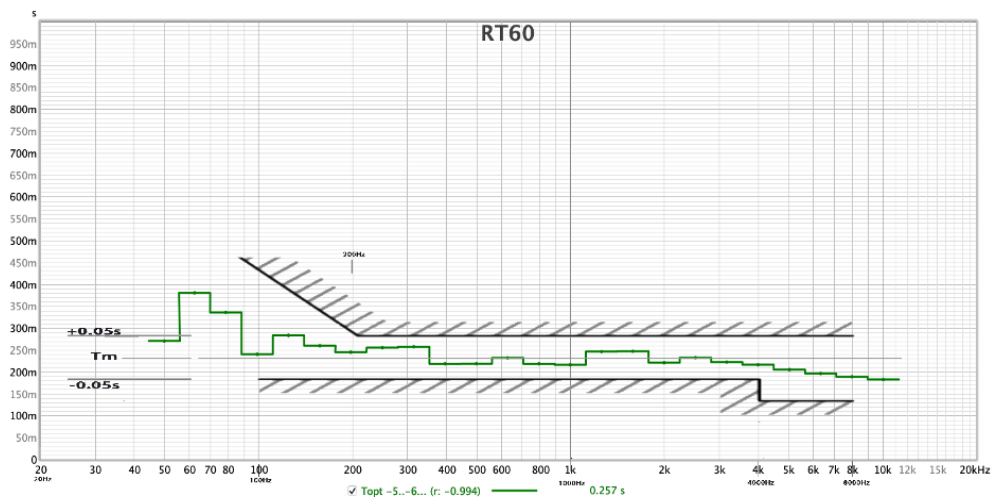
## RT60

Ce paramètre a été détaillé dans le chapitre précédent. On retiendra que la régularité du RT60 en fonction de la fréquence est un critère probablement plus important que sa valeur absolue car cette régularité indique une réverbération homogène qui influe sur la qualité des timbres (et dans une moindre mesure sur l'image).

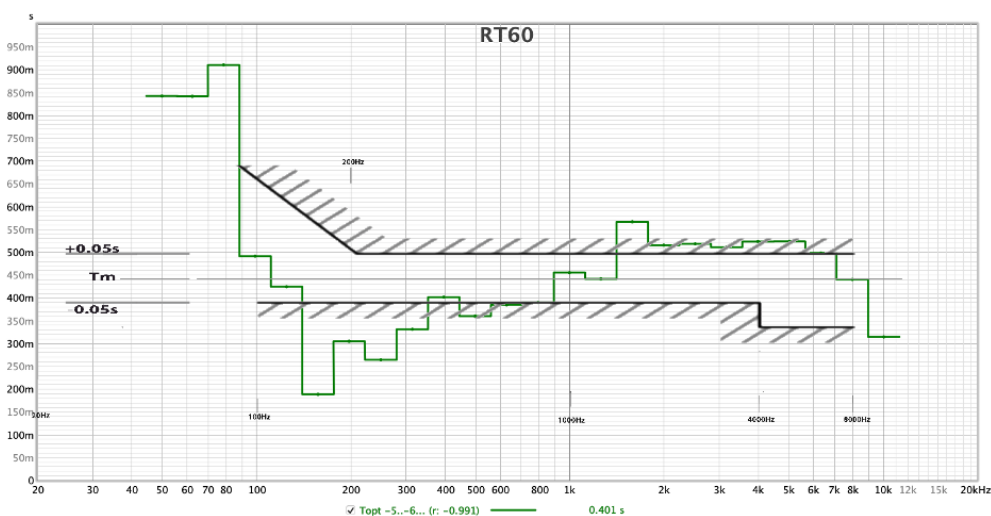
Un RT60 irrégulier sera un symptôme très significatif d'une perte de cohérence entre le champ réverbéré et le champ direct. En effet, si la décroissance de l'énergie sonore n'est pas uniforme à toutes les fréquences, les fréquences qui s'atténuent le plus lentement seront entendues comme étant plus fortes et donc seront mises en avant, et cela induira des colorations pouvant être très sensibles suivant les plages de fréquences concernées.

Pour les objectifs chiffrés, on se référera à l'abaque indiqué précédemment, ainsi qu'à la formule proposée pour le calcul du RT60 cible.

*Ci-dessous un exemple de RT60 très bien contrôlé et stable :*



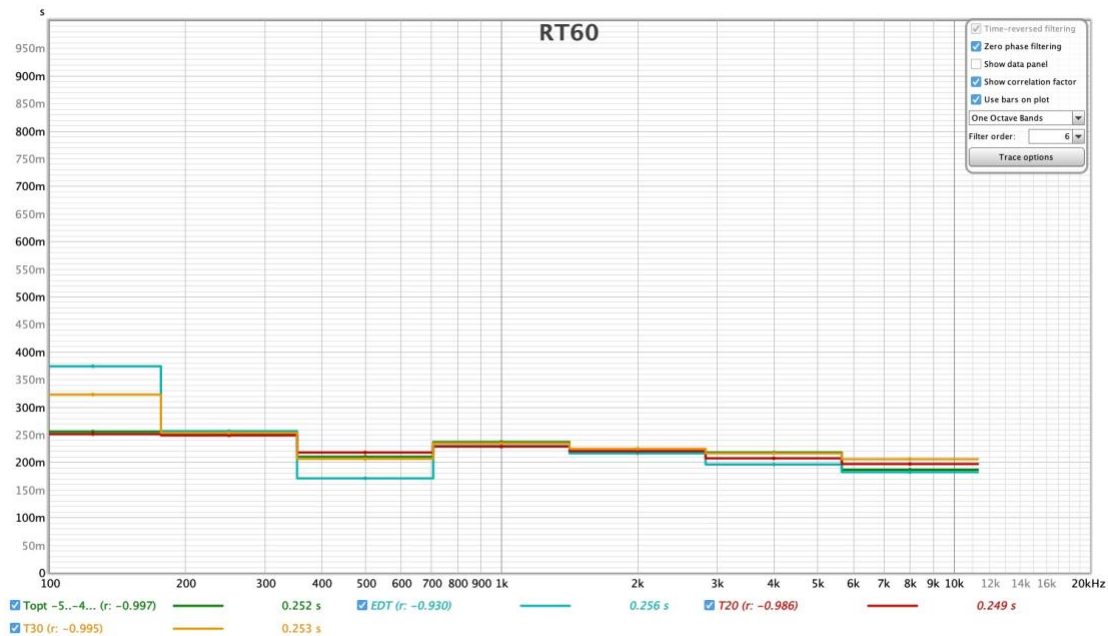
*Et ci-dessous un exemple de RT60 qui présente des difficultés de stabilité :*



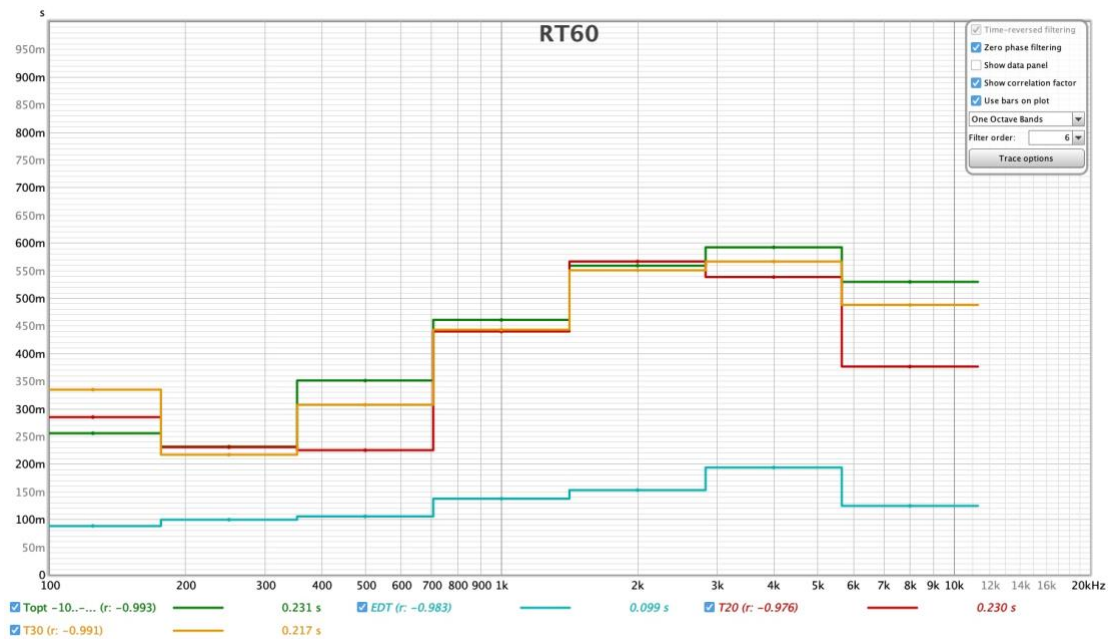


De même, on pourra aussi regarder l'écart entre le RT60, le T20, le T30 (et éventuellement l'EDT (Early Decay Time)), qui sera un bon indicateur de la cohérence fréquentielle des réflexions avec le champ direct.

Le même exemple, avec RT60 stable, que ci-dessus, avec Topt (RT60), T20, T30 et EDT entre 100Hz et 10000Hz, ici moyenné par octave pour meilleure lisibilité :



Et ci-dessous, l'exemple précédent qui présentait des difficultés de stabilité, qui montre bien que la pente de décroissance de l'énergie sonore n'est pas régulière, ni homogène dans chaque bande de fréquences.





## Courbe de réponse Fréquence/Amplitude

Pour définir correctement des objectifs sur ce paramètre, il faut analyser séparément la zone « modale » et la zone « réverbérée ». Ces 2 zones, comme indiqué précédemment, sont situées de part et d'autre de la fréquence dite de coupure, ou fréquence de Schröder. En pratique, on va donc se fixer des objectifs différents dans ces 2 zones, avec moins de contraintes dans la zone modale car il est illusoire de s'affranchir complètement des effets des ondes stationnaires.

Les 2 critères principaux vont être les écarts maximaux qu'on peut tolérer entre les points hauts et bas de l'amplitude vs fréquence pour chaque voie (droite et gauche), et l'écart maximal entre la voie droite et la voie gauche.

Deux paramètres sont également importants à comprendre :

- Le lissage de la courbe qu'on va utiliser puisqu'il change considérablement l'allure de la courbe.
- La moyenne des mesures en plusieurs points (méthode des 9 mesures mentionnée plus haut).

Je pense aujourd'hui que pour avoir une idée, la plus proche possible, de ce qu'on entend vraiment, il faut utiliser plusieurs représentations et critères.

Je recommande donc d'utiliser les visualisations suivantes :

- Lissage « psychoacoustic » entre 20Hz et 20000Hz sur la moyenne (arithmétique) des 9 mesures sur chacune des voies (droite et gauche).
- Lissage « 1/3 d'octave » et/ou « psychoacoustic » entre 20Hz et 20000Hz sur chacune des voies (droite et gauche) et également sur la somme des 2 voies, mesurées au sweet spot.
- Lissage « 1/24 d'octave » entre 20Hz et 300Hz sur chacune des voies (droite et gauche) et également sur la somme des 2 voies, mesurées au sweet spot.

J'utilise le plus souvent le lissage psychoacoustic plutôt que le classique 1/3 d'octave, car il me paraît plus représentatif de ce qu'on entend.

L'intérêt de regarder le lissage au 1/24 d'octave dans le grave, c'est d'identifier la position des modes plus facilement, et de voir l'amplitude des problèmes potentiels...

**Ainsi, dans la zone 250Hz-20000Hz, on visera :**

- +/-3dB maximum sur la moyenne de chaque voie indépendamment en lissage psychoacoustic,
- +/-3dB maximum sur chaque voie indépendamment, et les 2 voies ensemble sur la mesure au sweet spot en lissage 1/3 d'octave,
- et pas plus de 3dB d'écart entre les moyennes des 2 voies (droite et gauche) en lissage psychoacoustic.



## Et dans la zone 20Hz - 250Hz, on visera :

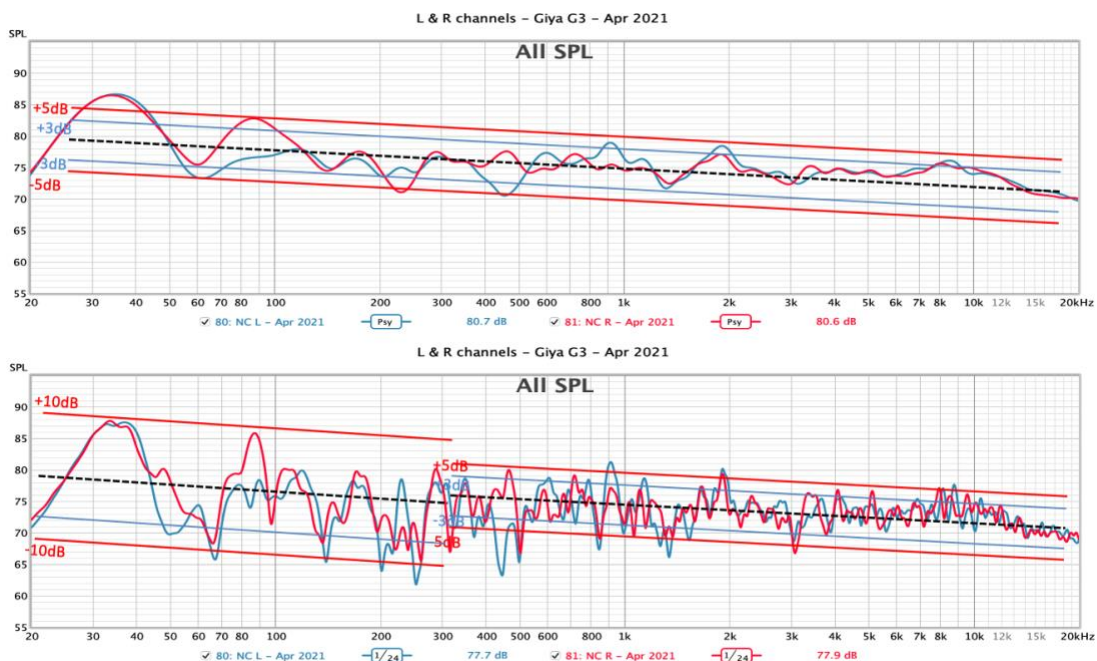
- +/-5dB maximum sur les 2 voies ensemble sur la mesure au sweet spot, et sur la moyenne de chaque voie seule, en lissage psychoacoustique,
- +/-10dB maximum sur les 2 voies ensemble sur la mesure au sweet spot, et sur la moyenne de chaque voie seule, en lissage 1/24 d'octave.

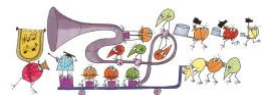
En pratique, une réponse parfaitement plate entre 20 et 20000Hz mesurée au sweet spot, n'est pas du tout la cible idéale. Pour une reproduction naturelle, il est plutôt recommandé d'avoir une courbe cible légèrement décroissante. Mais, à vrai dire, le nombre de courbes cibles recommandées est très divers sur internet, et cela fait l'objet de nombreux débats...

Personnellement, je pense qu'on peut avoir intérêt à laisser une remontée légère du grave de quelques dB (entre 3 et 5dB) vers 40Hz à partir de 80Hz ou 100Hz, ensuite un plateau jusqu'à 1000Hz ou 2000Hz, puis une pente légère (1dB/octave) jusqu'à 20000Hz.

Et, très souvent, lorsque tous les paramètres acoustiques dans une pièce sont corrects, et que les enceintes ont été bien conçues, **cette courbe en pente légèrement décroissante est obtenue naturellement !**

*Ci-dessous un exemple très correct sur une mesure des voies gauche et droite effectuée au sweet spot, en lissage psychoacoustique et 1/24 d'octave.*



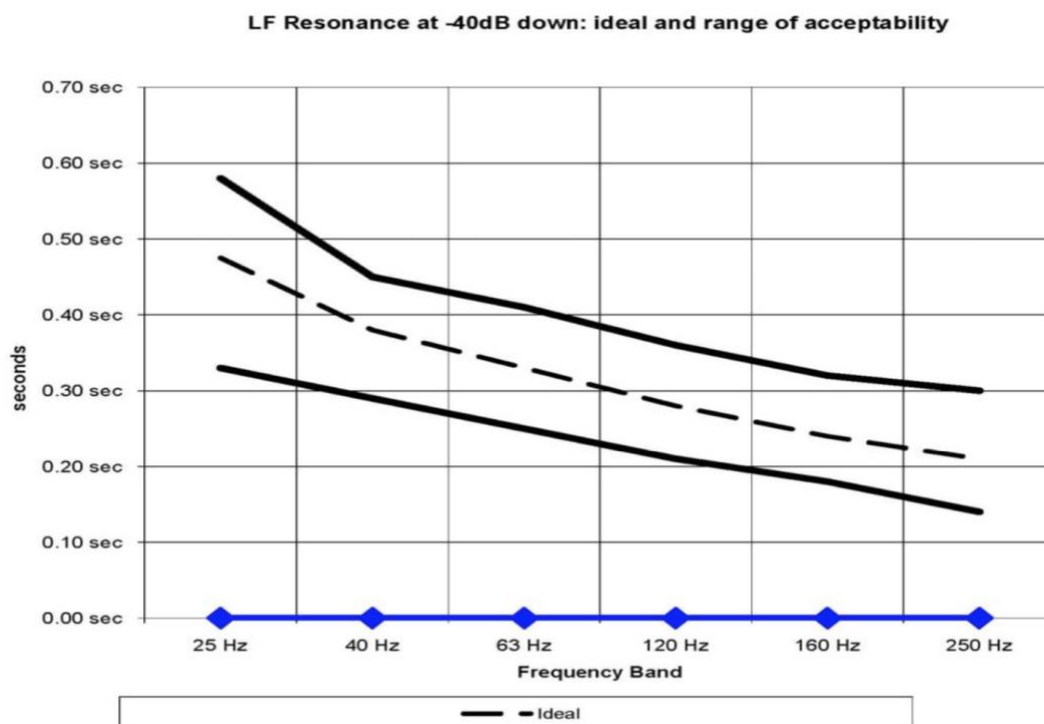


## Spectrogram

Le **Spectrogram** (en mode Fourier), va permettre de mesurer **une caractéristique du trainage**, en particulier dans la zone modale. On va donc s'intéresser à ce qu'il se passe entre 20Hz et 300Hz (au-dessus de 300Hz, on verra que le Decay donne plus d'informations).

Pour évaluer le trainage, qui est le temps que met un son à s'atténuer, avec le spectrogram, il faut décider d'une atténuation en décibels (dB) et mesurer le temps mis pour l'atteindre. On va donc, de façon arbitraire, regarder le temps mis par les fréquences modales (celles qui trainent), pour s'atténuer de 40dB. Le Decay, de son côté, nous permettra de voir ce qu'il se passe avant d'atteindre 40dB d'atténuation.

Selon diverses sources, l'objectif « idéal » est, pour une atténuation du son de 40dB, de ne pas dépasser 450ms entre 20Hz et 40Hz, 350ms entre 40Hz et 300Hz (et si on veut regarder l'ensemble, il faudrait avoir le reste au-dessus de 300Hz à peu près stable à une valeur aux environs de 200ms). Dit comme ça, ça n'est pas hyper simple à visualiser, mais en pratique, on peut utiliser l'abaque ci-dessous et viser la ligne des pointillés :

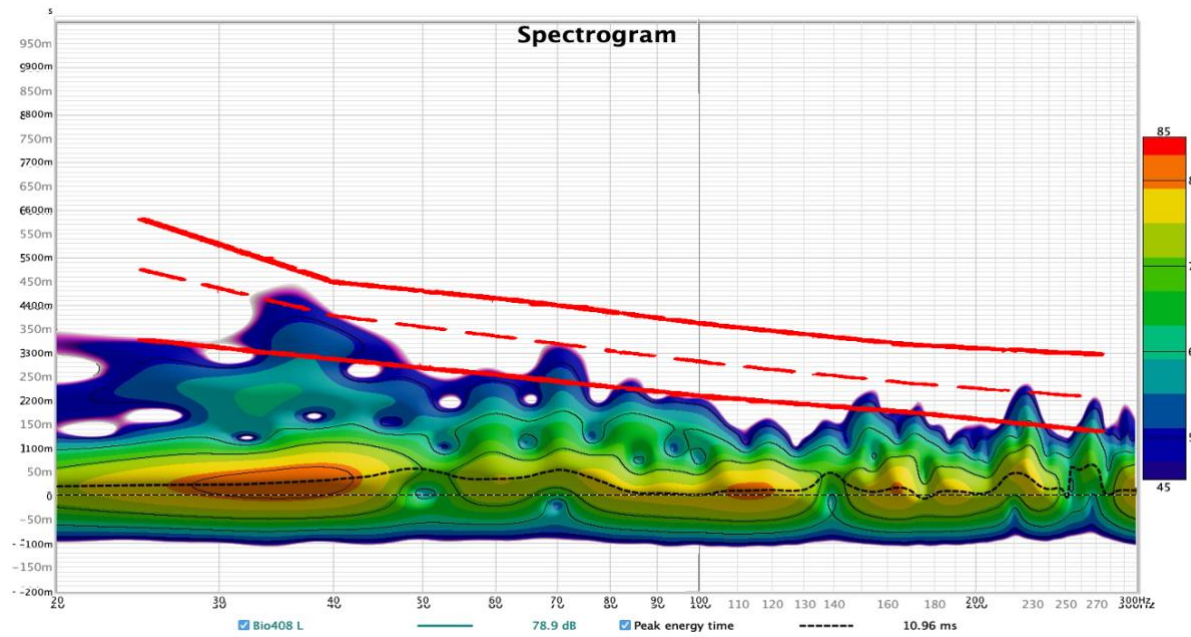


Cela étant, dans les petites pièces, et sous 200Hz, c'est un challenge TRES difficile à atteindre. On pourra donc considérer que dans les pièces de moins de 25m<sup>2</sup> (et 60m<sup>3</sup>), obtenir un spectrogram qui tient sous la ligne noire du haut est déjà un bon résultat.

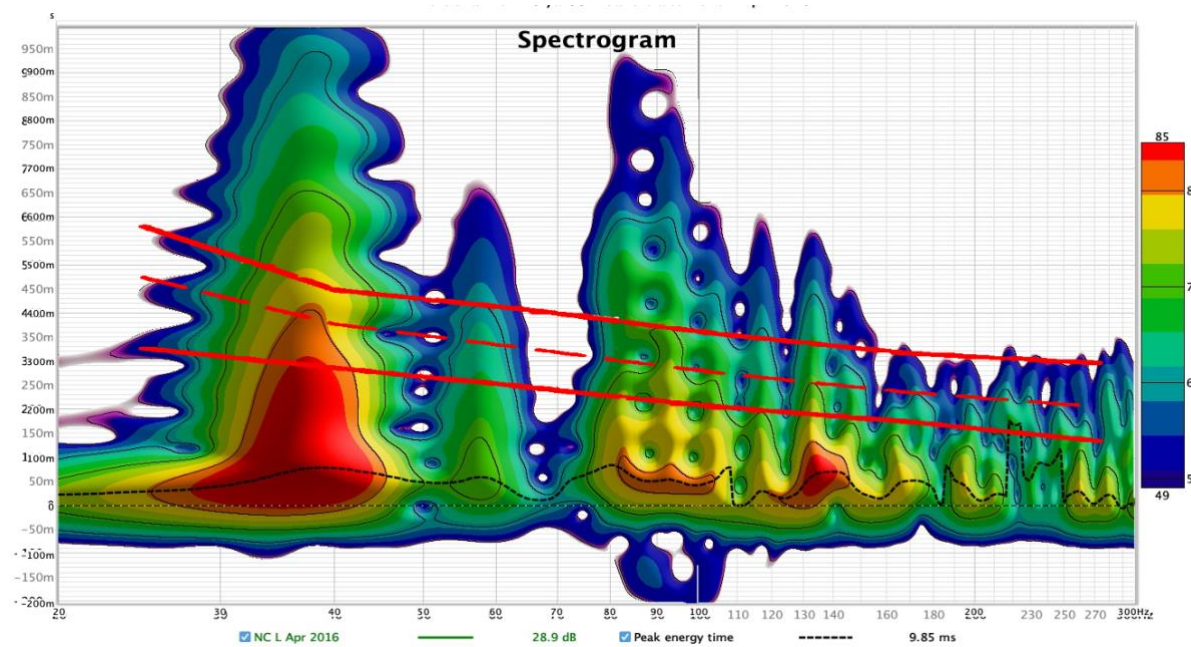
Et on verra que pour améliorer ce paramètre dans une petite pièce, il est difficile (en fait, impossible) d'échapper à un minimum de traitement passif.



Un exemple correct ci-dessous :



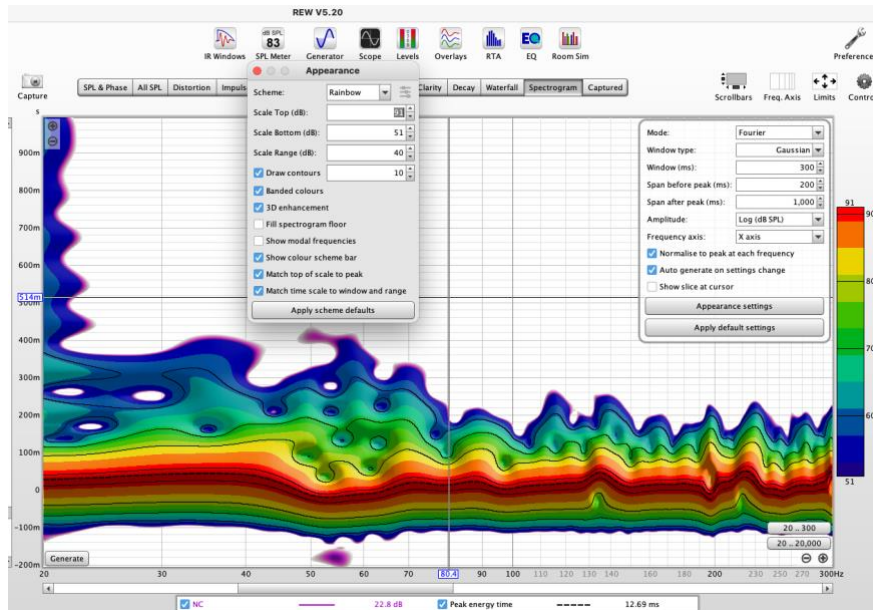
Et un exemple d'un cas beaucoup moins favorable :





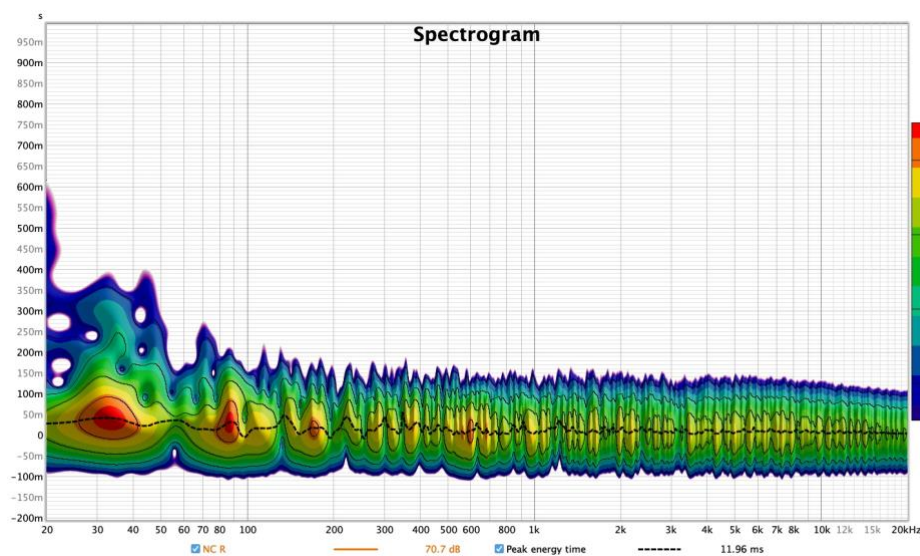
On peut également utiliser le Spectrogram pour regarder comment s'amortissent les fréquences à partir de leur amplitude de départ, plutôt qu'à partir de la même amplitude moyenne ou de la même amplitude pic, comme vu ci-dessus. Ceci permet de visualiser indirectement la cohérence de la décroissance de l'énergie sonore à chaque fréquence. Idéalement, toutes les fréquences devraient décroître à la même vitesse, et le spectrogram devait donc être un rectangle régulier.

Pour cela on cochera les cases « Normalize to peak at each frequency » et « Match top of scale to peak », pour obtenir un graphe comme ci-dessous :



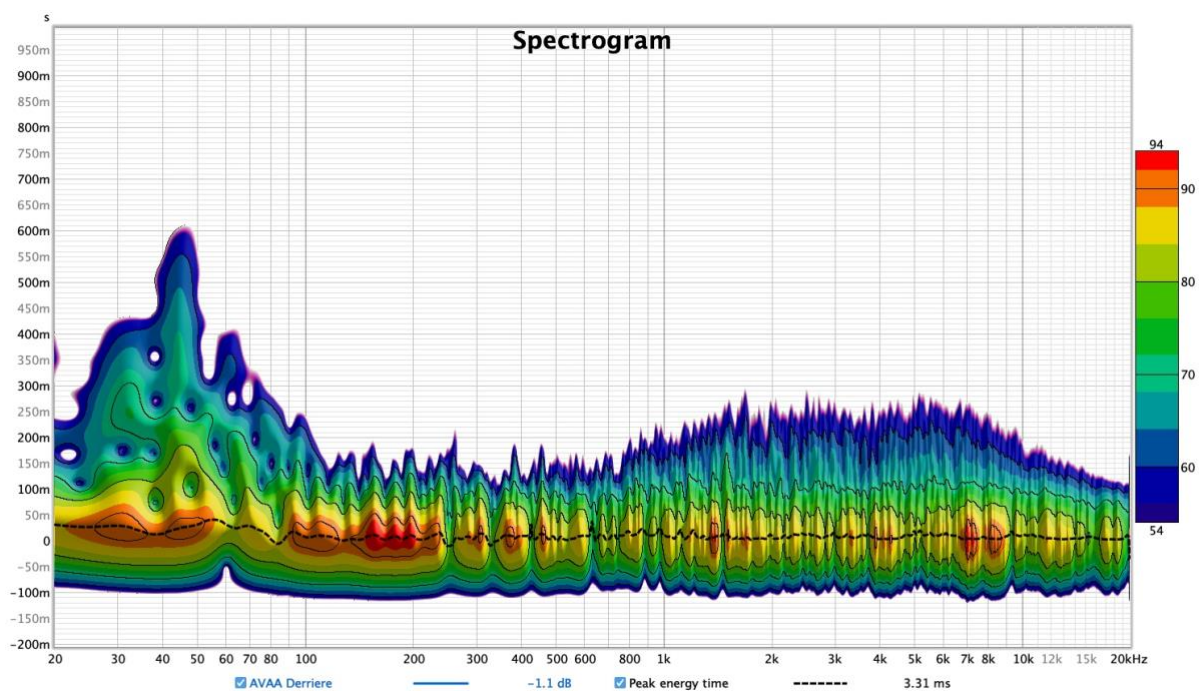
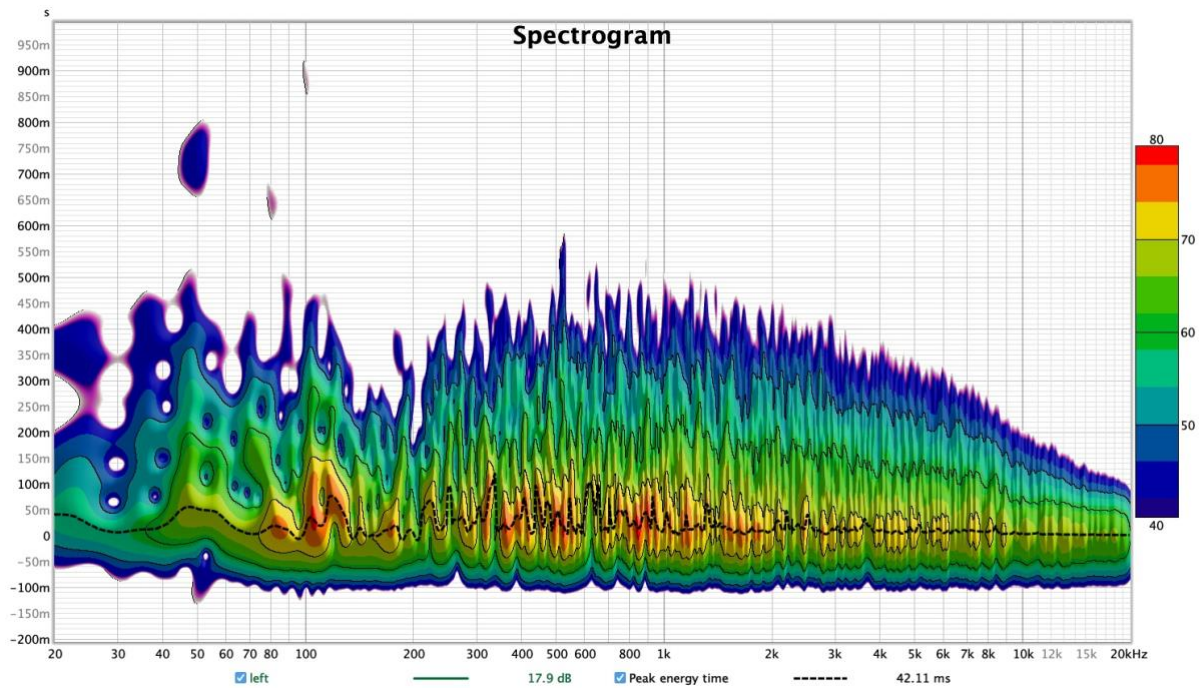
On peut également faire afficher l'ensemble du spectre audio (20-20000Hz), avec ou sans cocher la case « Normalize to peak at each frequency », pour regarder comment s'amortissent toutes les fréquences. Idéalement, la zone 300-20000Hz devrait être aussi un rectangle bien régulier.

Ci-dessous un exemple « correct » :





Et ci-dessous, 2 exemples de problèmes qu'on peut rencontrer et qui mériteraient une analyse et un traitement adapté :



Dans les 2 cas ci-dessus, le champ réverbéré est clairement déséquilibré et peut induire une brillance excessive que l'écoute doit très vraisemblablement confirmer. Ces « défauts » seront d'ailleurs également visibles sur le RT60, le decay, et l'ETC.



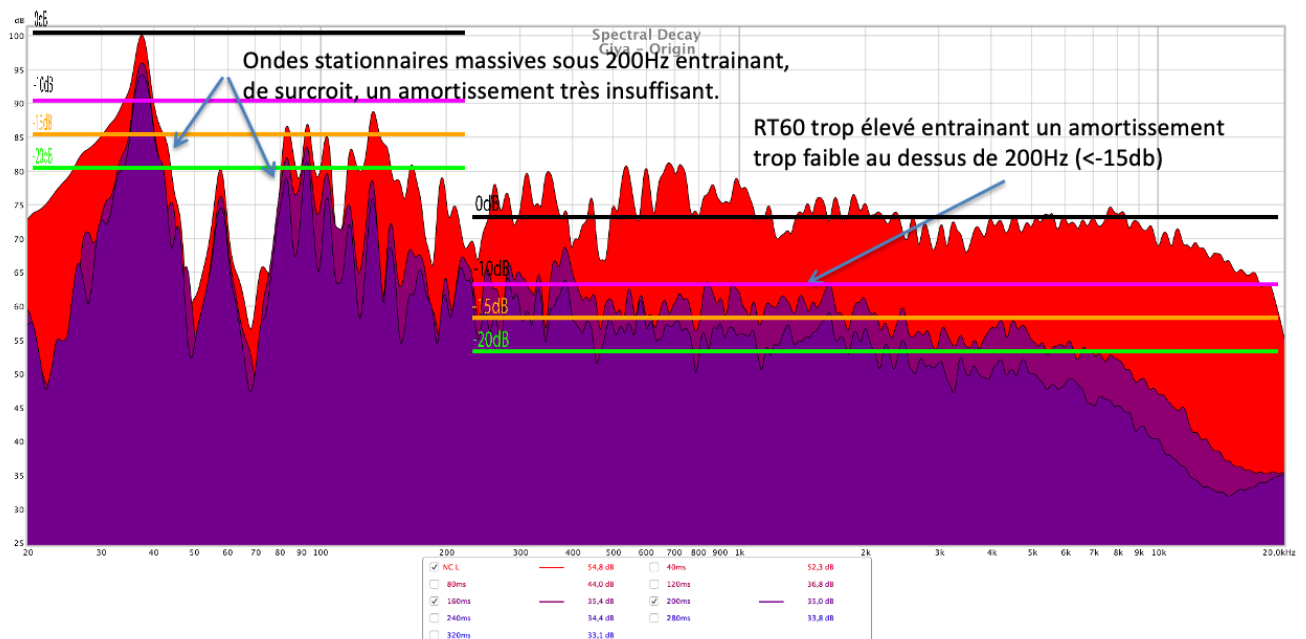
## Decay

Le **Decay** va donner des indications complémentaires au spectrogram et à la courbe amplitude/fréquence, sur la position des fréquences modales, sur le trainage, et sur la cohérence spectrale des réflexions avec le champ direct.

En fait, le Decay donne la courbe amplitude/fréquence au cours du temps à partir du temps 0, jusqu'à l'extinction complète du son (en fait jusqu'à ce qu'il soit noyé dans le bruit de fond de la pièce d'écoute). On peut donc observer les fréquences qui traînent et/ou celles qui s'atténuent de façon non homogène (et donc qui pointent vers les endroits où les réflexions ne sont pas cohérentes avec le champ direct). On peut donc regarder comment cette courbe amplitude/fréquence décroît toutes les 40ms par exemple. Idéalement, cette décroissance devrait être parfaitement régulière à toutes les fréquences.

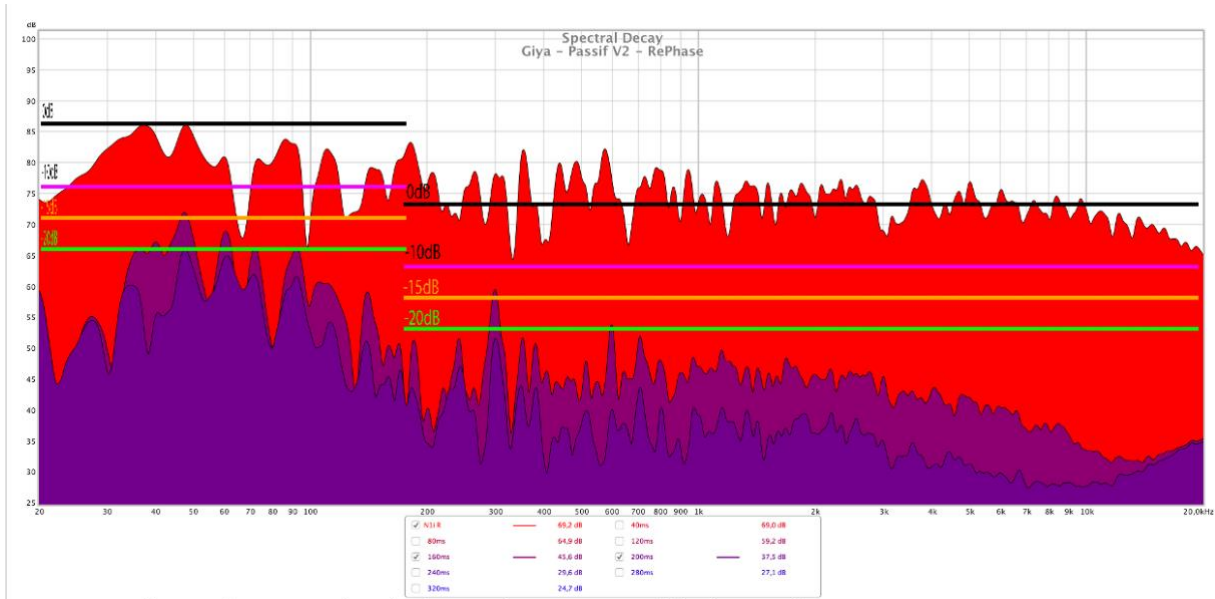
Pour une analyse rapide du **Decay**, on essaiera, idéalement, d'obtenir une atténuation de 20db entre la courbe (amplitude/fréquence) la plus haute (celle à 0ms) et celle à 160ms (avec un lissage au 1/24 d'octave). En pratique, si c'est relativement facile à obtenir au-dessus de 200Hz, c'est très difficile en dessous de 100Hz... et on acceptera une atténuation moindre (15dB par exemple).

*Ci-dessous un exemple de pièce plutôt très mauvaise (lissage 1/24). On voit qu'on tient à peine les -10db à partir de 400Hz, et en dessous on voit très bien l'impact des différents modes (pics et creux) en particulier sous 200Hz, qui induisent également un trainage massif (très peu d'atténuation à 160ms).*



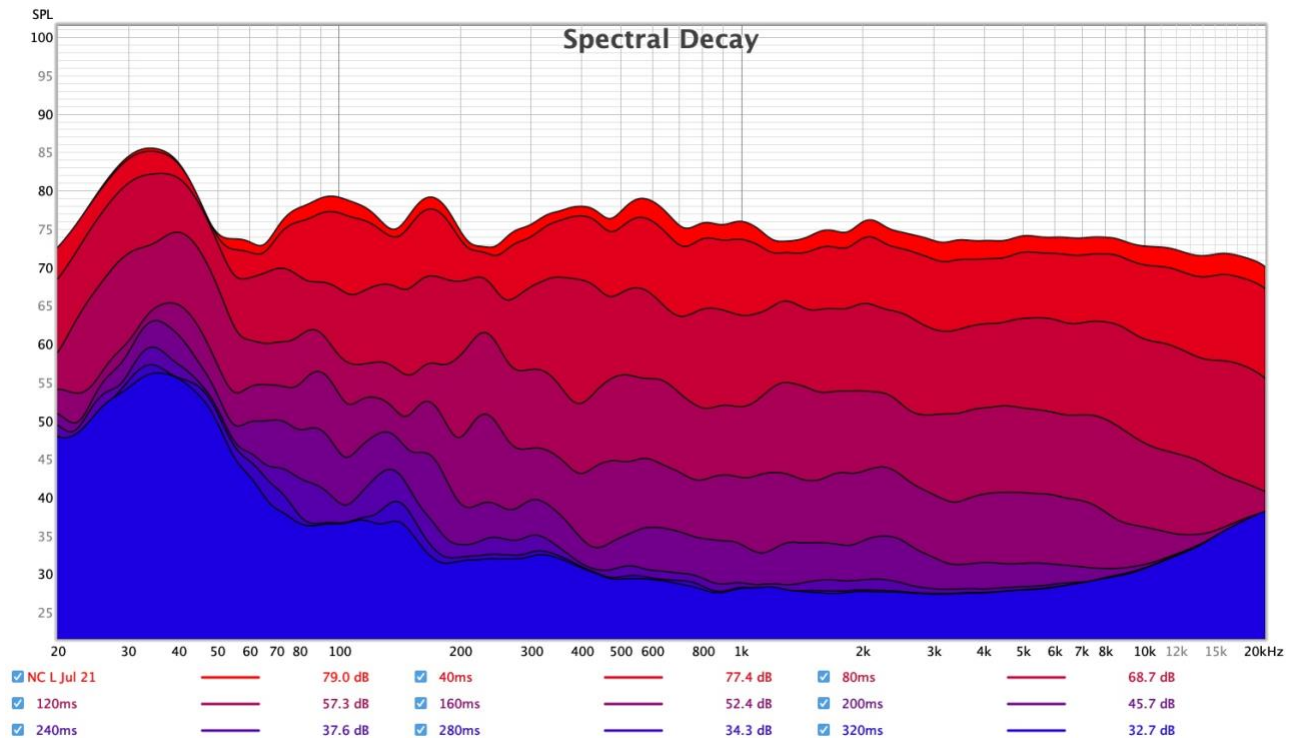


Et un cas bien meilleur, puisqu'on voit qu'il tient -15db sous 100Hz même avec un lissage au 1/24 d'octave.



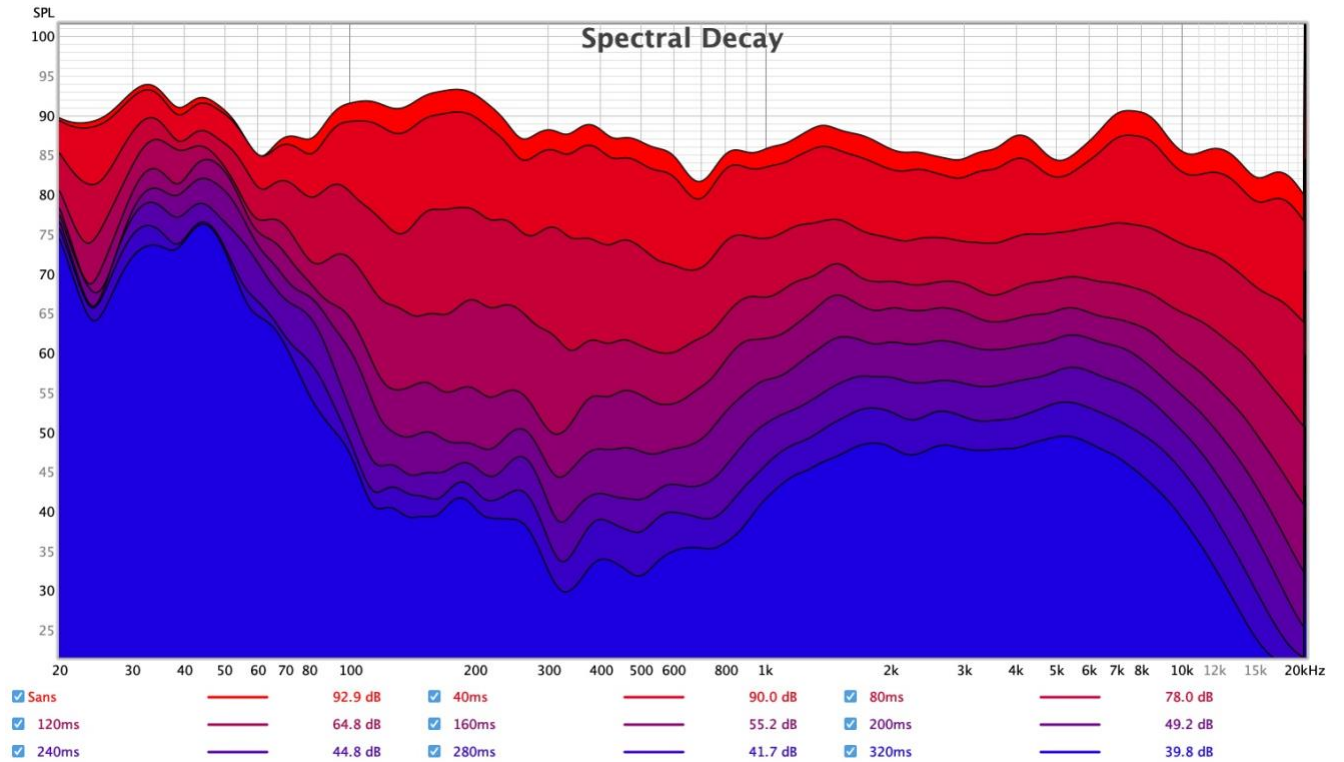
Le Decay permet également d'illustrer visuellement les décalages de cohérence spectrale entre le champ direct et les réflexions.

Un exemple correct ci-dessous (le lissage au 1/3 d'octave permet de voir plus simplement ces décalages dans la zone réverbérée). On voit ici une décroissance assez régulière toutes les 40ms qui vient se noyer progressivement dans le bruit de fond (en bleu ci-dessous).





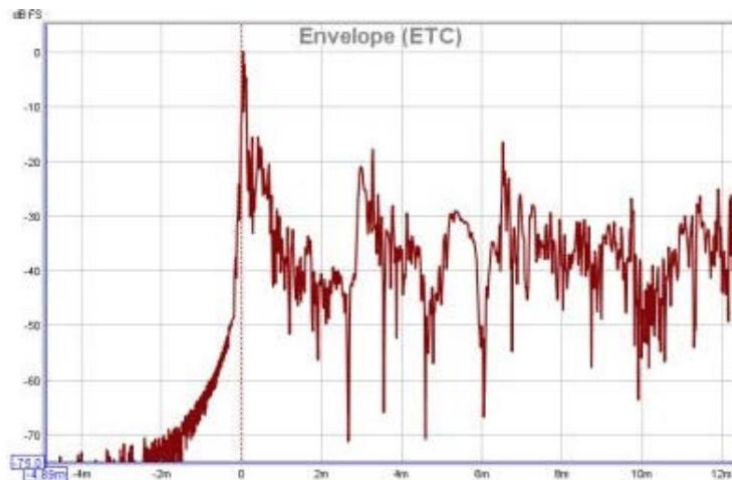
Et un exemple avec quelques problèmes, ci-dessous. On voit une décroissance irrégulière toutes les 40ms qui vient se noyer progressivement dans le bruit de fond. A l'écoute, il est fort probable que cela se traduise par un aigu un peu trop brillant et une sorte d'effet « loudness » du fait du creux dans la zone 100Hz-1000Hz et des modes dans la zone 30-50Hz, malgré une courbe amplitude/fréquence à  $t=0ms$  plutôt correcte.





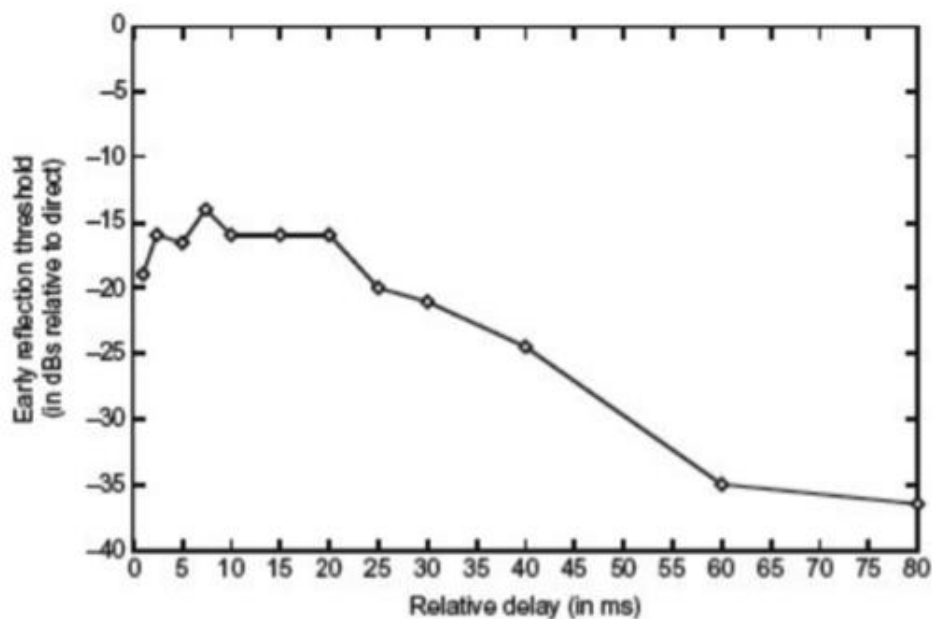
## ETC

Pour l'**ETC**, la notice d'emploi de REW donne la définition ci-après qui me paraît expliquer l'essentiel : « L'enveloppe de l'impulsion, également appelée courbe énergie-temps ou ETC (Energy Time Curve), est utile pour identifier les réflexions et voir la forme globale de la réponse impulsionnelle. Le graphique ci-dessous montre l'enveloppe, les pointes après le pic initial sont dues aux réflexions de la surface de la pièce, le premier pic se produit 3,25 ms après le pic initial indiquant que le son a parcouru 1,11 m supplémentaires pour atteindre le microphone. »



Chaque pic indique ainsi un « reflet » (réflexion sur une paroi) de l'impulsion initiale et, suivant son amplitude et son délai d'arrivée au sweet-spot, il va affecter plus ou moins la capacité de l'oreille/cerveau à créer l'illusion de la performance enregistrée.

De façon pragmatique, comme indiqué précédemment, on utilisera la grille suivante comme référence, qui donne le niveau maximum acceptable en fonction du temps.

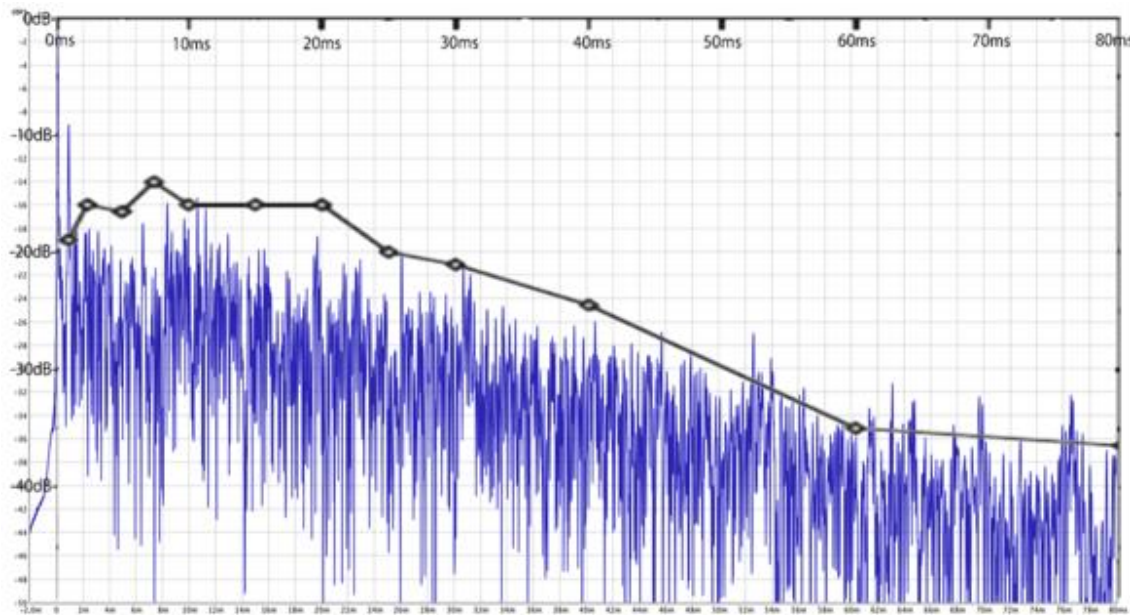




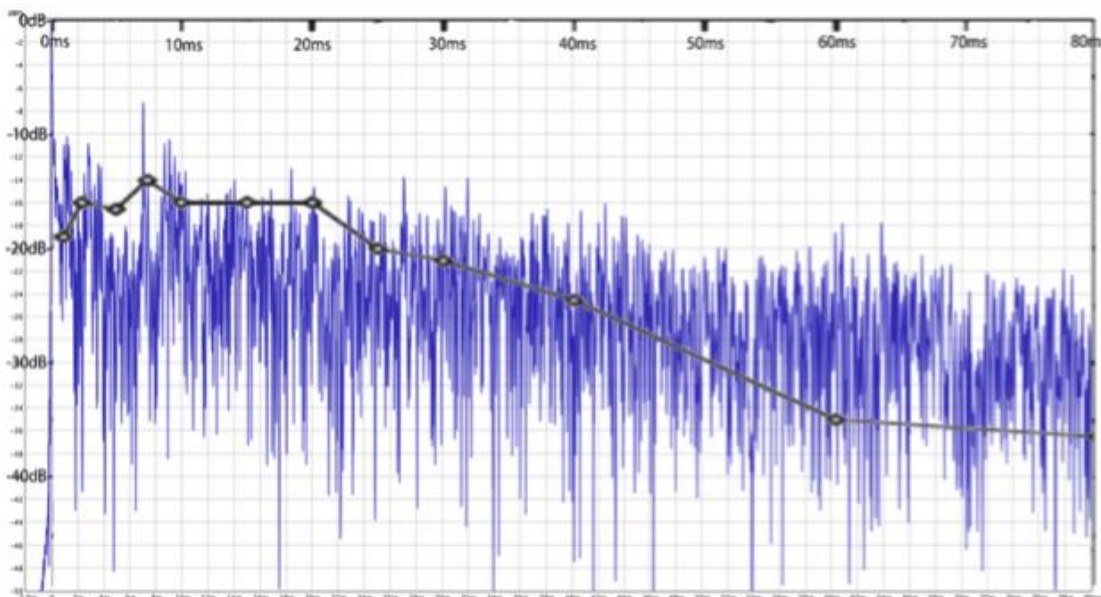
On peut donc se fixer comme objectifs :

- Niveau des réflexions primaires (sur les premières 20ms) inférieur d'au moins 15dB (si possible 20dB) vs le signal initial.
- Pas d'image « fantôme » du signal émis visible sur au moins les premières 20ms.
- Niveau des réflexions secondaires décroissant de 20dB supplémentaires sur les 40ms suivantes.

Ce qui donne par exemple dans un cas favorable:



Et dans un cas beaucoup moins favorable :



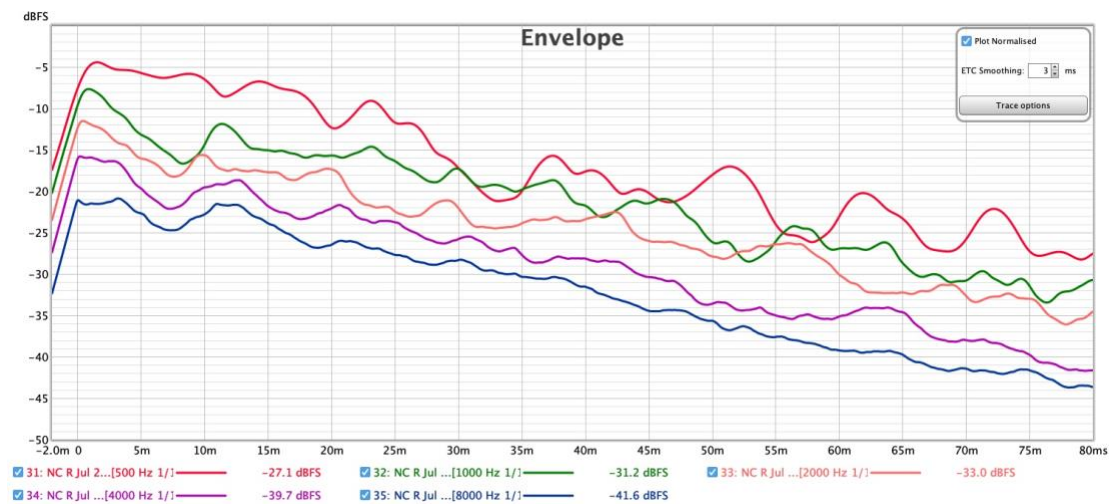
L'[Annexe 1](#) donne, par ailleurs, quelques exemples d'utilisation concrète de l'ETC, pour placer astucieusement les traitements passifs.



Au-delà de l'identification des réflexions primaires qui nuisent à la création de l'image, **on peut éventuellement utiliser l'ETC pour regarder plus précisément la cohérence spectrale des réflexions avec le champ direct dans les 40 premières millisecondes** (ce qui complète la vue donnée par le decay qui est peu lisible avant environ 80ms).

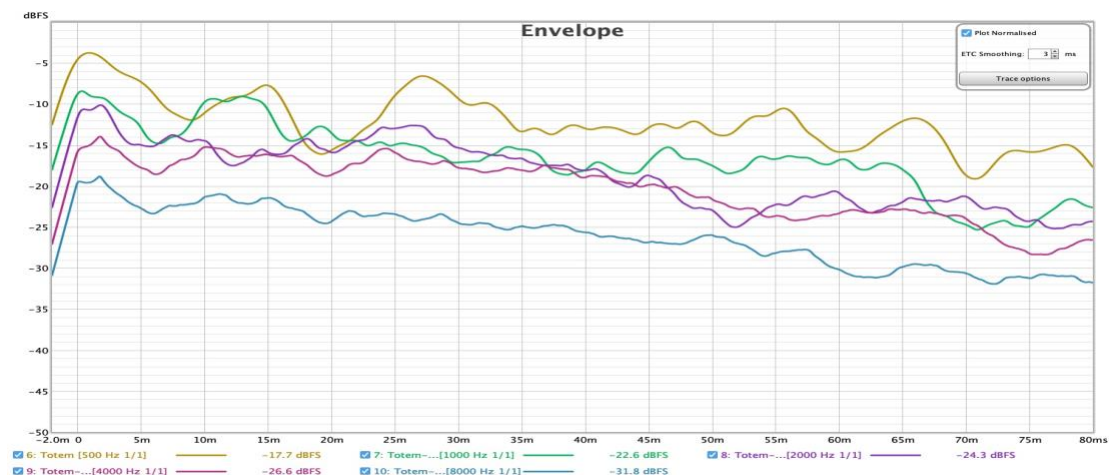
L'ETC donnant la décroissance de l'énergie totale (intégrant donc toutes les fréquences), il va falloir découper le spectre fréquentiel en sous-zones et regarder comment l'énergie décroît dans chacune de ces zones. Pour cela, on utilisera l'onglet « Filtered IR » de REW, et on filtrera les fréquences les plus significatives de la zone réverbérée, par octave (500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz, 8000Hz). On appliquera un lissage entre 1ms et 3ms afin de pouvoir comparer plus facilement la décroissance de l'énergie à chacune de ces fréquences.

On obtient, dans une pièce traitée, un résultat à peu près correct, qui ressemble à ça :



Idéalement, on devrait obtenir des courbes décroissantes parallèles entre elles, au moins sur les 40 premières millisecondes.

Et ci-dessous, dans une pièce non traitée, on voit que les courbes se croisent à différents moments car elles ne décroissent pas de façon homogène, ce qui traduit quelques problèmes de cohérence spectrale, qu'il faudra essayer de corriger avec un traitement passif adapté.





## Impulse, Step et Phase

Ici, il n'est question que de paramètres intrinsèques aux enceintes, ce qui complique un peu la mesure puisque celle-ci est forcément affectée par les réflexions multiples liées au local. De plus, le micro n'inclut pas forcément de fichier de calibrage pour la phase (contrairement à l'amplitude qui est fournie) et donc la mesure précise de la phase est difficile à mettre en œuvre.

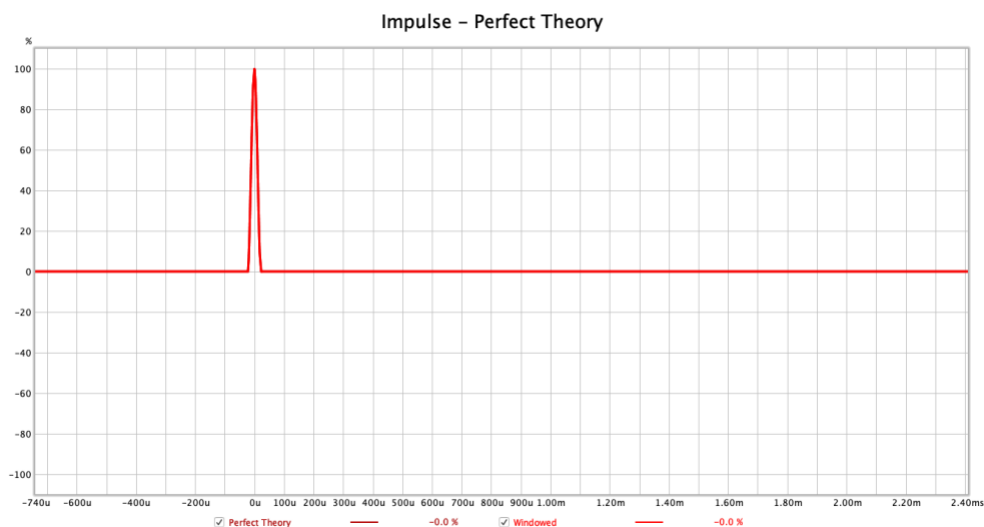
Cela étant, on peut quand même obtenir des résultats assez significatifs grâce à la mesure en 9 points (qui réduit considérablement l'influence des réflexions), et en tous cas suffisants pour mettre en place une correction numérique efficace.

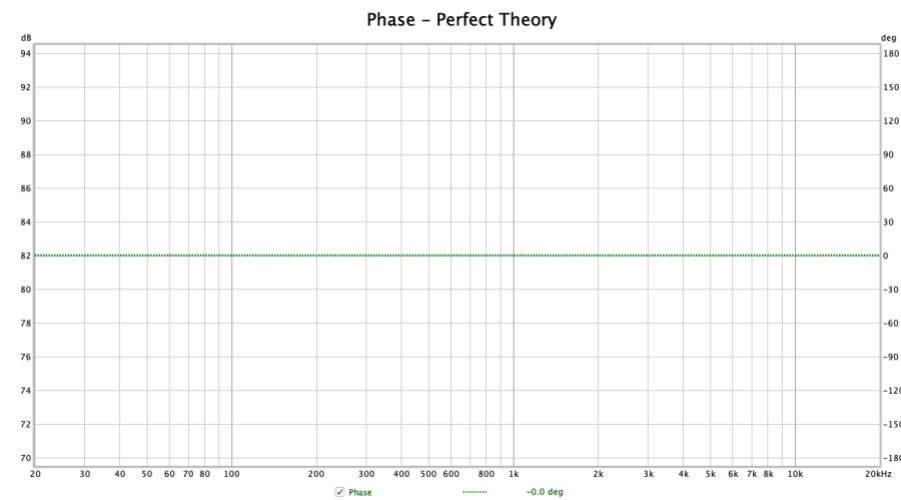
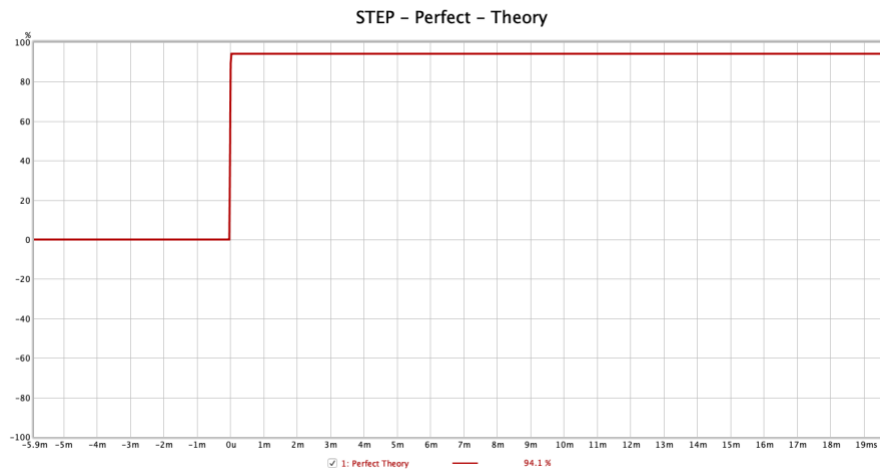
Pour ceux qui en douteraient, on peut noter que Dirac Live utilise uniquement ces mêmes 9 mesures avec un simple micro UMIK-1 pour en déduire des impulsions de correction numérique remarquables, et le tout, en automatique ! Home Audio Fidelity fait de même à partir de ces mêmes mesures, et le résultat obtenu est très convaincant. RePhase permet de générer ses propres corrections en manuel, mais de façon tout aussi efficace, au bémol près de l'effort d'investissement personnel demandé.

On peut aussi, bien entendu, très bien apprécier la musique sans corriger la phase, ou acheter des enceintes qui sont en phase par conception (Leedh E2 par exemple). Une phase correcte apporte cependant une meilleure lisibilité de l'image qui peut être intéressante, lorsqu'on met en œuvre une correction numérique.

Pour ce qui est de définir les objectifs à atteindre, on peut regarder tout d'abord ce que serait l'Impulse, le Step et la phase d'un système qui retransmettrait l'ensemble du spectre audio de 0Hz à 1MHz de façon parfaitement plate. Ceci est évidemment impossible, et pas nécessairement désirable d'ailleurs, mais ça permet de mieux comprendre les mesures qu'on va pouvoir réaliser.

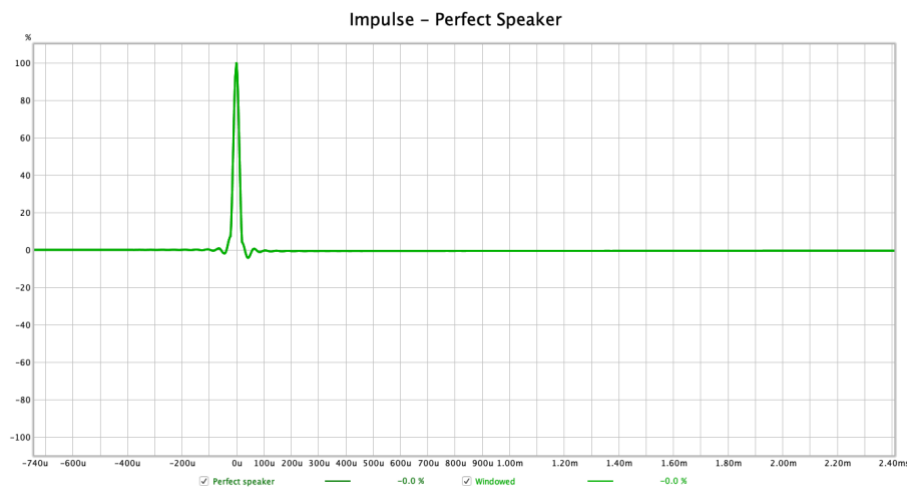
Voici donc l'allure des paramètres en question pour un système « parfait ».

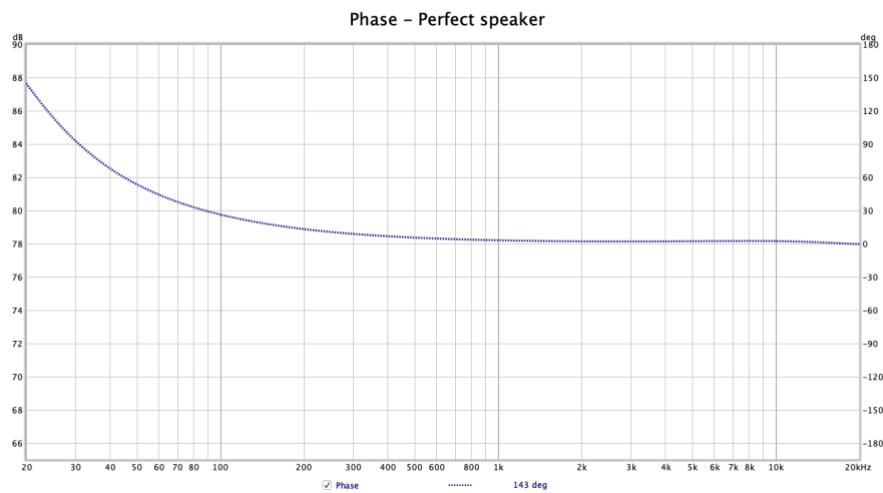
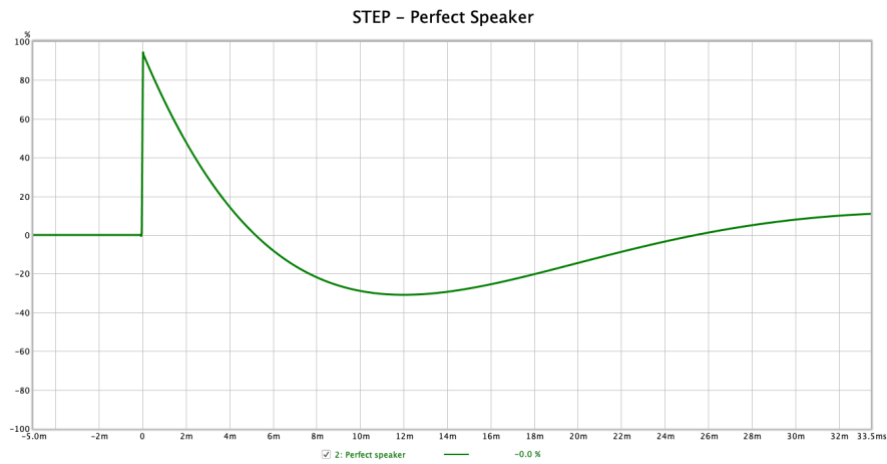




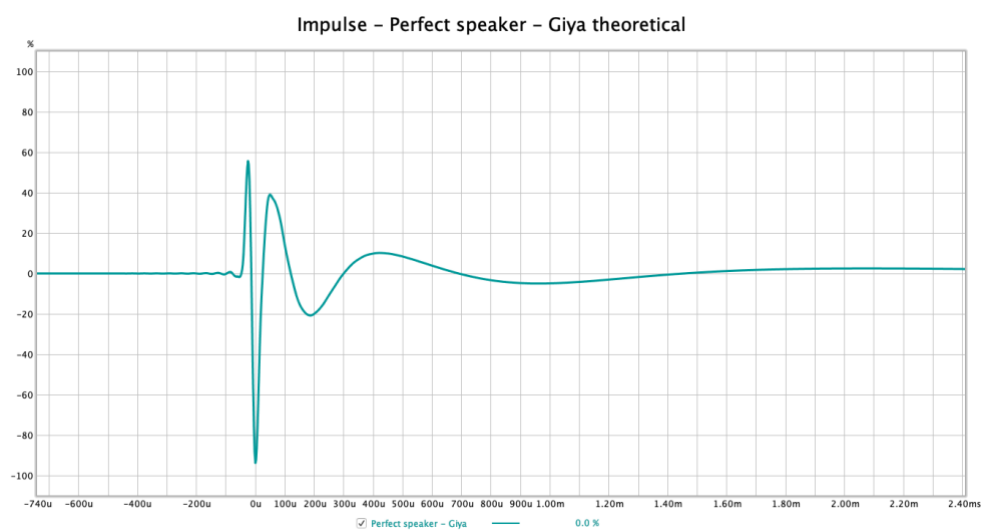
Maintenant, dans la réalité, un système audio a forcément une coupure dans le bas du spectre et une autre dans le haut du spectre, du simple fait qu'aucun des éléments du système n'est capable de retranscrire l'ensemble du spectre audio audible (20Hz-20000Hz) de façon parfaite, et notamment les enceintes. Un système dont la réponse amplitude/fréquence serait à -3dB à 20Hz et -2dB à 20000Hz, le reste étant parfaitement plat entre les deux serait déjà une performance exceptionnelle.

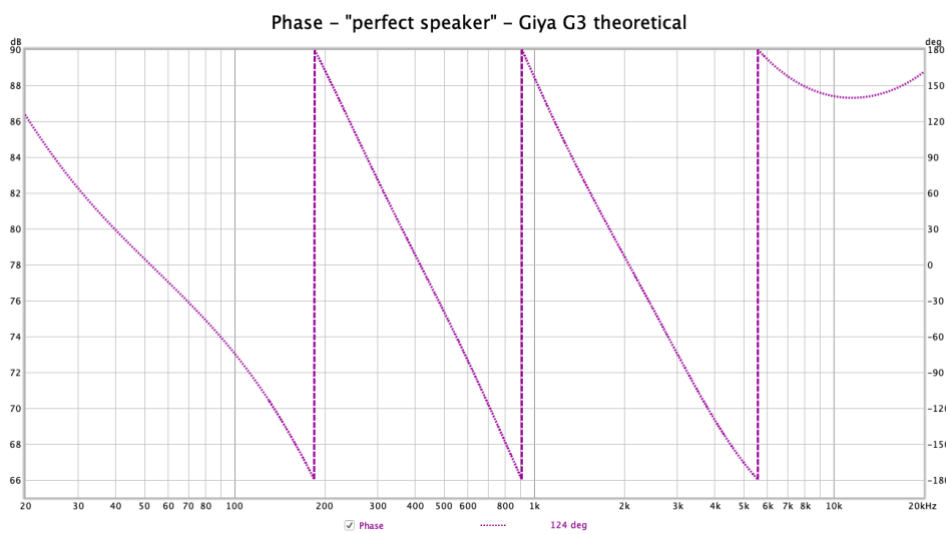
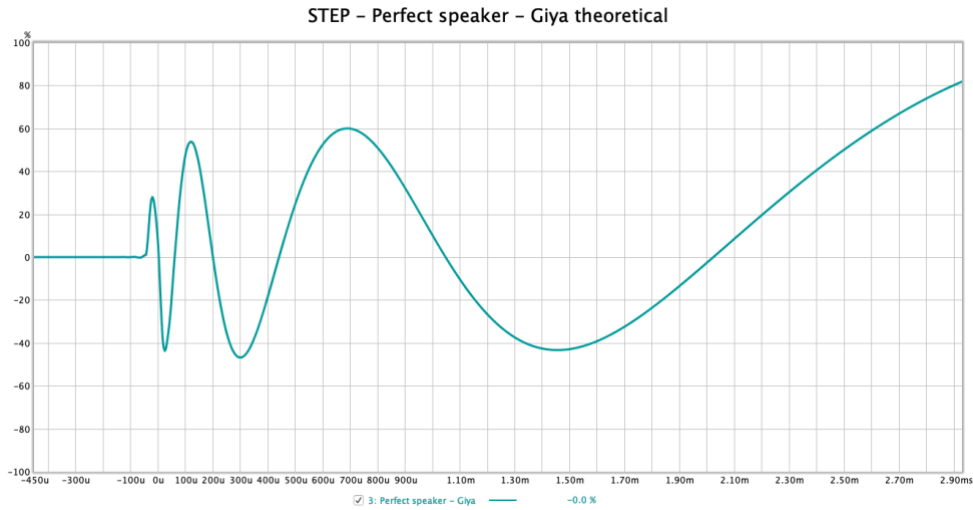
Voici, dans ce cas-là, ce que deviennent les paramètres précédents.



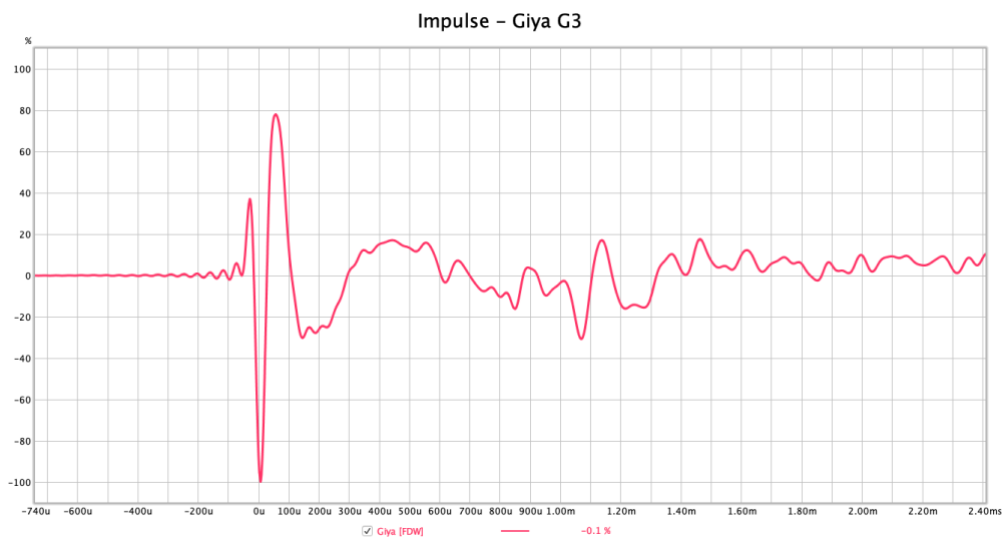


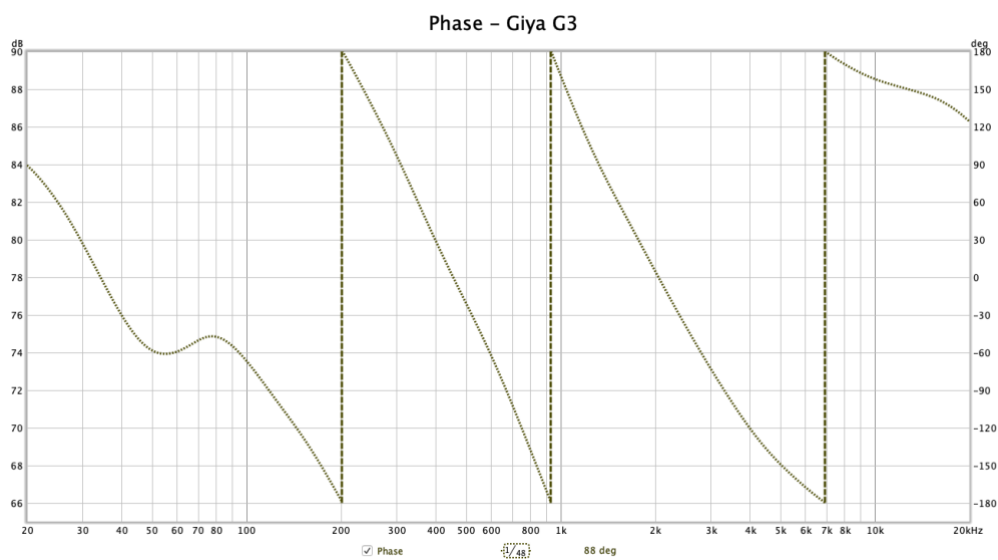
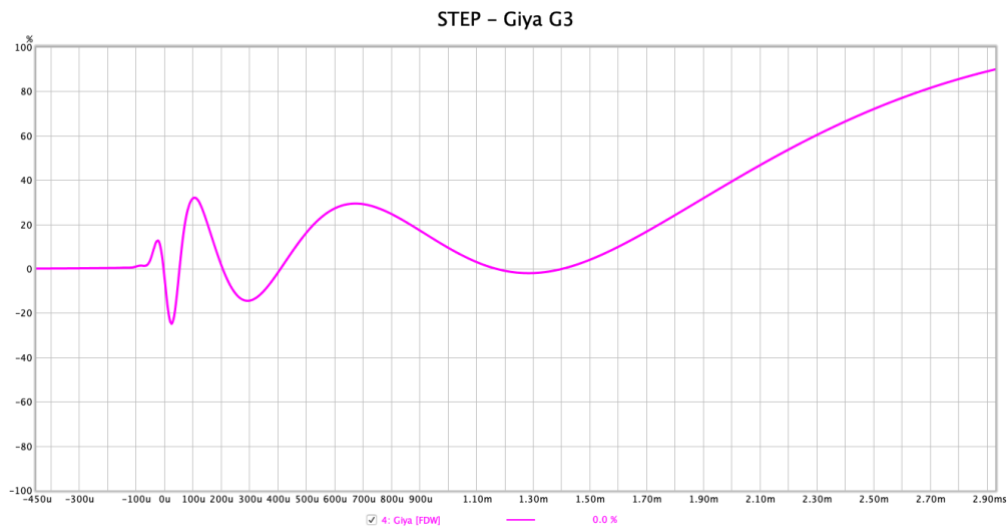
Il convient de remarquer que si les enceintes n'ont pas les HPs en phase (ce qui est très fréquent sur l'immense majorité des enceintes), les paramètres ci-dessus deviennent comme ceci (exemple Vivid Audio Giya G3 « parfaite » avec filtre 24dB/octave simulé) :





Et dans la vraie vie, lorsque la courbe de réponse subit les contraintes d'une pièce correctement traitée mais encore imparfaite, voici ce qu'on peut obtenir sur ces mêmes paramètres (Vivid Audio Giya G3 réelle) :





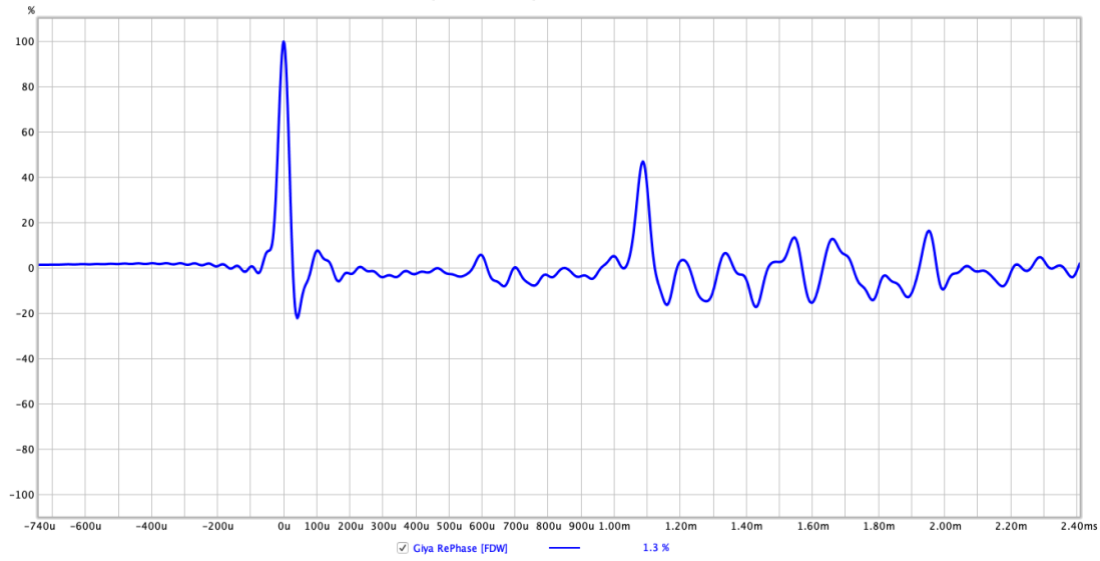
On voit que le comportement mesuré des Giya G3 est très proche de la théorie. L'impulse subit les réflexions (oscillations visibles sur le graphe après l'impulse), mais le Step et la phase (après fenêtrage pour éliminer un maximum de réflexions) est très cohérent avec l'attendu.

Enfin, il est intéressant de regarder ce qu'on obtient avec une correction numérique (ici avec RePhase) de la phase, sur ces mêmes enceintes dans le même local.

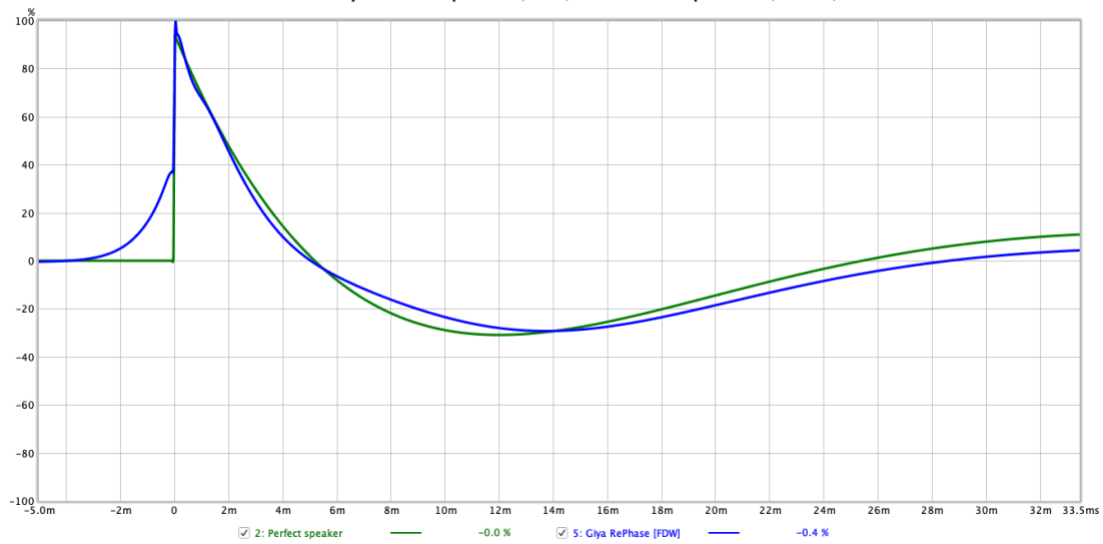
J'ai superposé le STEP théorique de l'enceinte « parfaite » avec celui des Giya avec la correction numérique afin de bien voir la similitude, qu'on retrouve aussi sur l'impulse et sur la phase, mais avec les oscillations liées aux réflexions du local qu'on ne peut totalement éliminer de la mesure.



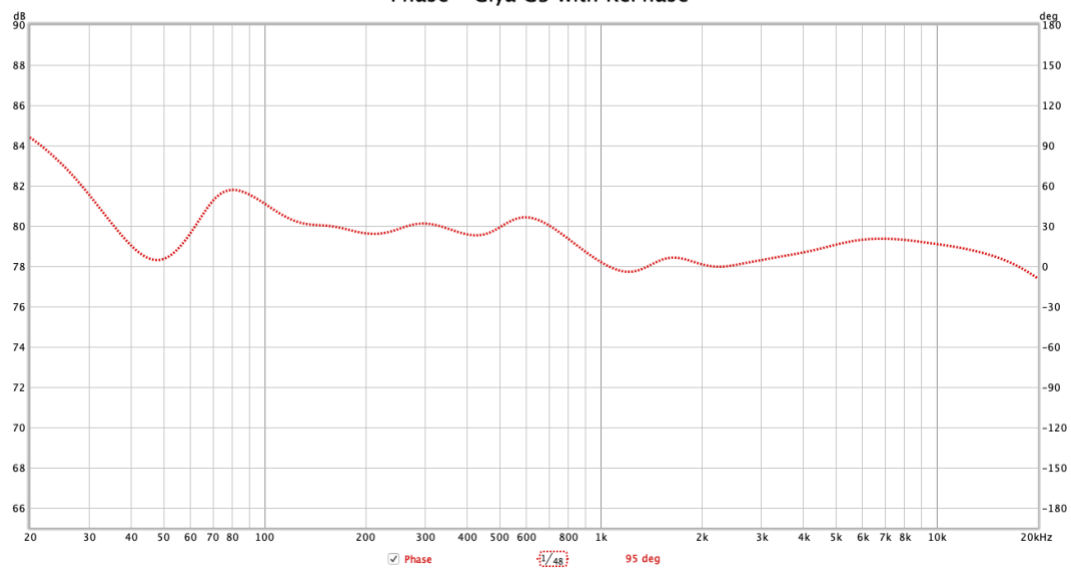
Impulse – Giya with RePhase



STEP – Giya with Rephase (Blue) vs Perfect Speaker (Green)



Phase – Giya G3 with RePhase

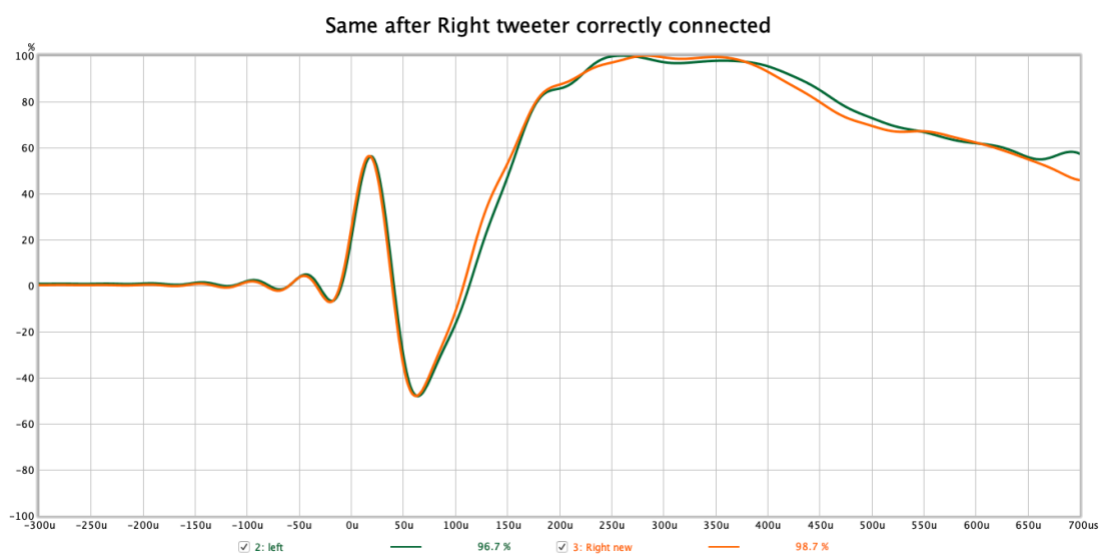
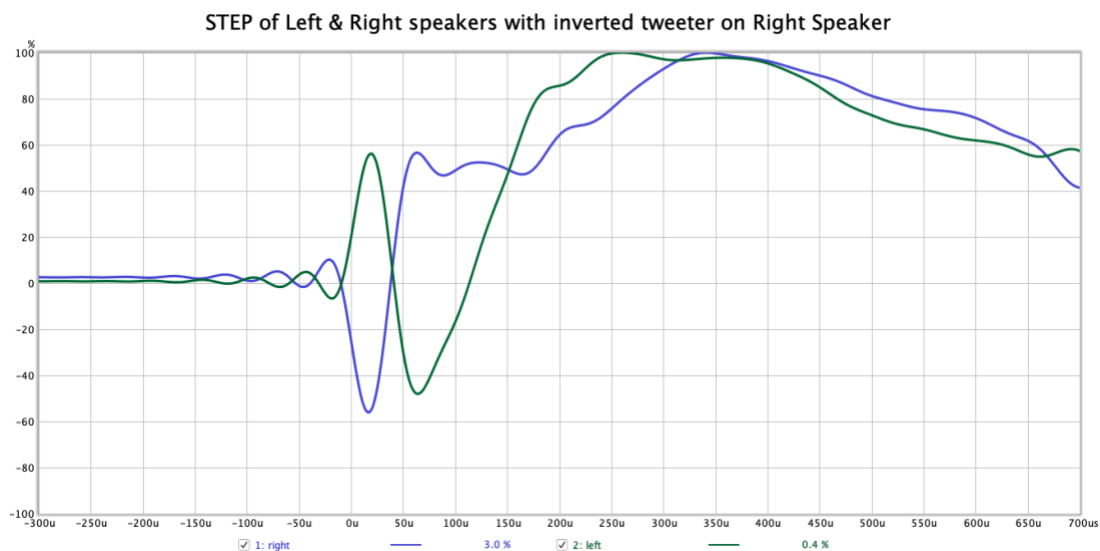




Les exemples ci-dessus montrent que le sujet impulse/Step/phase est un sujet plus complexe à analyser que les autres paramètres acoustiques, mais aussi qu'on peut raisonnablement observer et estimer la mise en phase des différents HPs des enceintes, et, plus intéressant, qu'il est possible de corriger cette phase (avec un logiciel de correction numérique) et de se rapprocher ainsi du comportement d'une enceinte parfaitement en phase.

On voit également que si la mesure de la phase peut être difficile à comparer avec un idéal théorique « plat » puisque l'amplitude est forcément perturbée par la pièce et influe directement sur la valeur de la phase, on peut se servir du STEP pour valider plus facilement qu'on a bien un comportement proche de l'idéal recherché.

Et accessoirement, cette mesure peut être aussi utile pour vérifier que les HP des enceintes droite et gauche sont correctement montés. Un exemple ci-dessous de 2 enceintes du commerce dont le tweeter était monté à l'envers et qui a pu être correctement rebranché après détection du problème à la mesure.





## Quelles actions correctives mener ?

Une fois le premier bilan acoustique effectué, on se retrouve avec un ensemble de paramètres qui présentent des écarts plus ou moins significatifs avec l'idéal qu'on pourrait souhaiter, et la question principale devient : que puis-je faire ?

En fait, ce qu'il est important de bien comprendre, c'est qu'**il ne faut pas se focaliser sur un paramètre en particulier, mais plutôt sur l'ensemble des paramètres** en même temps. Ceci veut dire qu'il est plus efficace d'améliorer un peu l'ensemble des paramètres, plutôt que d'améliorer beaucoup un seul paramètre.

L'exemple le plus marquant, et fréquent sur les forums audiophiles, est la focalisation sur la courbe amplitude/fréquence qui fait l'objet de multiples discussions et recommandations. En pratique, et notamment grâce à la correction numérique, il est possible d'obtenir une courbe amplitude/fréquence qui répond parfaitement à quasiment tous les critères souhaités sur ce paramètre.

Pourtant, ce n'est en aucun cas la garantie d'un résultat satisfaisant à l'écoute, car si les autres paramètres sont négligés (RT60, ETC, trainage) l'écoute peut rester très quelconque malgré une courbe amplitude/fréquence parfaite. Et, à vrai dire, la courbe amplitude/fréquence est probablement le dernier paramètre à essayer de régler après avoir amélioré le RT60, l'ETC, le decay et le spectrogram.

En effet, ces paramètres « temporels » ont plus d'influence sur notre perception que les variations d'amplitude/fréquence que, finalement, notre cerveau semble plus capable de gérer que les incohérences temporelles et fréquentielles entre le champ direct et les réflexions.

Par ailleurs, si on se réfère aux courbes de sensibilité de Fletcher et Munson, on remarque que les écarts d'amplitude ne sont pas perçus de la même façon suivant les fréquences auxquelles ils se produisent.

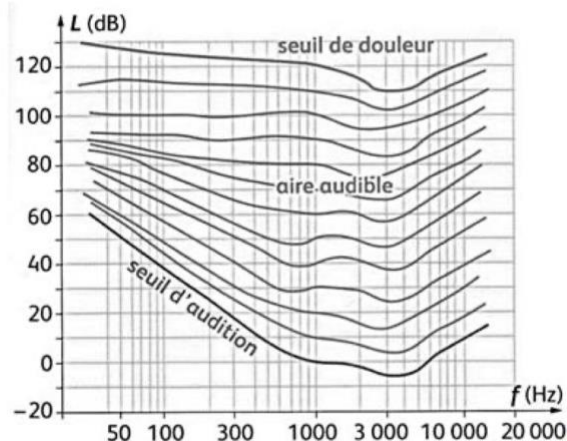
### DIAGRAMME DE FLETCHER

Le diagramme de Fletcher ci-contre montre les courbes d'égalisation de sensibilité de l'oreille.

Chaque ligne relie les niveaux sonores donnant la même sensation auditive.

À 50 Hz par exemple, on commence à entendre un son pour un niveau sonore de 50 dB environ. Autour de 300 Hz, le niveau minimum tombe à 20 dB. Et, vers 3000 Hz, on arrive au maximum de sensibilité de l'oreille humaine, autour de 0 dB.

Autrement dit : l'effet sur l'oreille d'un son de 50 dB à 50 Hz est identique à celui d'un son de 20 dB pour une fréquence de 300 Hz.






On voit ainsi que même lorsqu'on écoute de la musique à un niveau moyen entre 75dB et 85dB, on perçoit bien moins les éventuels écarts d'amplitude dans les basses et hautes fréquences que dans la zone « médium » allant de 300Hz à 5000Hz environ où l'oreille est très sensible.

C'est donc dans cette zone (300Hz-5000Hz) où il faudra être plus attentif à la cohérence fréquentielle des réflexions avec le champ direct, et aussi aux écarts d'amplitude, entre les 2 voies notamment, mais qui sont, en fait, très rares lorsque les enceintes sont correctement conçues !

En résumé, ce qu'il faut retenir, c'est que **l'objectif est de trouver un compromis acceptable sur l'ensemble des paramètres**. L'optimisation de l'un des paramètres au détriment d'un autre est généralement une mauvaise option pour le résultat global (par exemple, obtenir un ETC parfait en augmentant fortement l'absorption, se traduit souvent par un RT60 déséquilibré, et cela donne des timbres peu crédibles et une dynamique réduite).

**La pensée du jour**



Les devises Shadok

S'IL N'Y A PAS DE SOLUTION  
C'EST QU'IL N'Y A PAS DE PROBLEME.

Pour définir un plan d'action correctif global, il faudra séparer le traitement de la zone modale et de la zone réverbérée car les correctifs à apporter seront de nature très différente. On aura donc **un plan d'action sur le temps de réverbération et les réflexions primaires**, et **un plan d'action sur les ondes stationnaires**, avec pour objectif l'amélioration coordonnée de l'ensemble des paramètres acoustiques.

Mais avant cela, si on n'a pas encore choisi ses enceintes, ça vaut la peine d'y réfléchir un peu avec une perspective acoustique et interaction avec la pièce d'écoute.



## Choix des enceintes vs Local d'écoute

Les enceintes sont, sans conteste (au moins pour la plupart des audiophiles), l'élément le plus important du système, et donc l'élément qui va déterminer principalement la performance maximum qu'on pourra espérer du système.

Leur interaction avec la pièce d'écoute va donc être déterminante car cette dernière, comme on l'a vu, va altérer significativement leur performance.

Donc, indépendamment des considérations habituelles qui président au choix des enceintes par les audiophiles (rendement, nombre de voies, filtres, encombrement/facilité de placement, qualité de fabrication, esthétique...), il pourra être astucieux de regarder leur capacité d'intégration dans le local d'écoute prévu, et notamment, leur dispersion polaire (horizontale et verticale) et le niveau sonore qu'elles peuvent produire dans le grave.

Une dispersion polaire homogène et large est un atout certain, mais va demander un traitement des parois (sol, murs, plafond) minimum, surtout si la pièce est de petites dimensions. De même, l'extension dans le grave est un atout pour la dynamique, l'impact et aussi l'image, mais elle peut devenir un handicap important si les modes de la pièce sont placés dans une zone où ils seront très audibles (50Hz-100Hz).

Il vaudra donc mieux réfléchir aux capacités que l'on aura de traiter la pièce d'écoute lors du choix des enceintes.

Si c'est une pièce dédiée dans laquelle on pourra traiter de façon cohérente et importante, il vaut mieux choisir les meilleures enceintes possibles sans contrainte, mais si c'est pour une pièce où aucun traitement ne sera possible (salon, pièce de vie), il vaudra mieux choisir des enceintes qui exciteront moins l'environnement en étant plus directives, et ayant moins d'extension dans le grave.

Enfin, il ne faut pas hésiter à demander aux fabricants les caractéristiques de leurs enceintes (ou choisir un fabricant qui les donne automatiquement, plutôt qu'un autre qui se contente du minimum...), afin de pouvoir faire un choix « technique » cohérent.

Et l'écoute préalable chez un revendeur ne donnera, hélas, en général, aucune information utile car la pièce d'écoute chez soi sera totalement différente et donc le résultat sera très imprévisible, et le plus souvent décevant...



## Actions sur le temps de réverbération et les réflexions primaires :

On va avoir 2 objectifs :

- Abaisser le temps de réverbération (RT60) de la pièce.
- Réduire l'influence des réflexions primaires au point d'écoute.

Je pense qu'il vaut mieux se focaliser d'abord sur les réflexions primaires car en les traitant on va aussi abaisser le temps de réverbération, et c'est sur la gestion des réflexions primaires qu'on perçoit l'amélioration la plus significative.

Il est aussi astucieux de mesurer le résultat après chaque modification afin de se rendre compte de l'efficacité (ou non) de ce qu'on vient d'installer. Ça permet de gagner du temps et de savoir si on a placé le traitement au meilleur endroit (et s'il sert à quelque chose, ce qui n'est pas toujours le cas...).

De façon pragmatique, il suffit donc traiter chaque surface de façon méthodique et systématique :

- Le premier traitement, et le plus facile à intégrer, c'est le grand tapis pour absorber les réflexions liées au sol.
- Le deuxième traitement c'est l'installation d'absorption ou diffusion à l'endroit où se produisent ces réflexions.

On les détermine facilement avec un miroir placé sur les murs. Il suffit de positionner un diffuseur ou absorbeur là où on voit les enceintes quand on est assis au lieu d'écoute. C'est facile à faire et on visualise l'efficacité de la chose sur l'ETC (ce qui permet d'ajuster la position du traitement si besoin est. Voir exemples en [Annexe 1](#)).

Le principal problème de ces traitements est, hélas, l'esthétique ! Les solutions proposées par GIK et Vicoustic par exemple, sont efficaces, et ne sont pas forcément moches, mais pas toujours faciles à intégrer en fonction du WAF...

- <http://qikacoustics.fr/produits/le-panneau-2a-alpha-diffuseur-absorbeur-bass-trap/>
- [https://www.thomann.de/fr/vicoustic\\_diffuseurs.html](https://www.thomann.de/fr/vicoustic_diffuseurs.html)
- [https://www.thomann.de/fr/vicoustic\\_multifuser\\_dc2\\_white.htm](https://www.thomann.de/fr/vicoustic_multifuser_dc2_white.htm)

Mais il y en a aussi plein d'autres du même genre, comme :

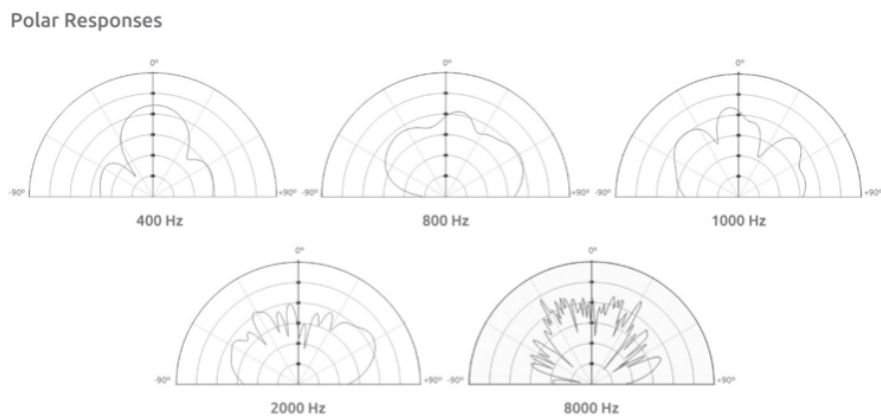
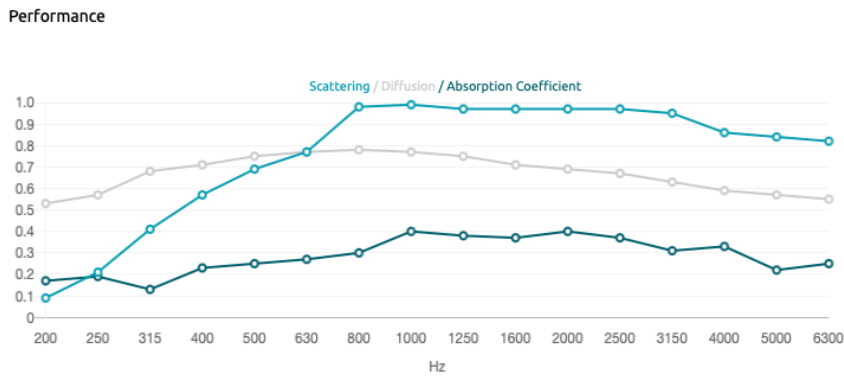
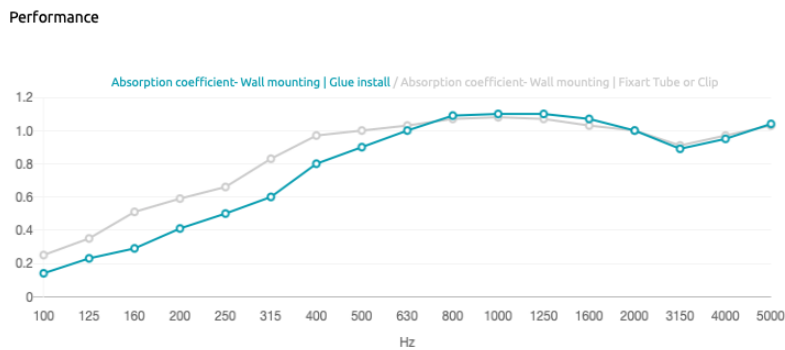
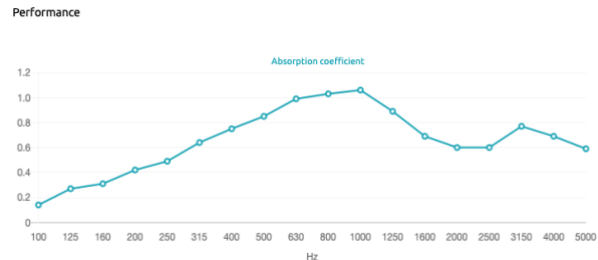
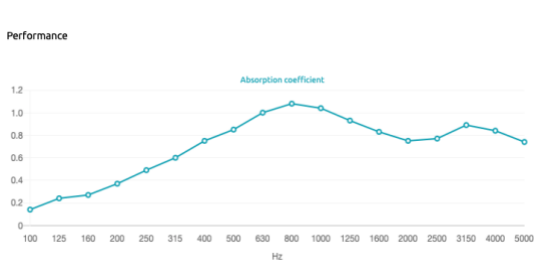
- PYT qui est plus facile à intégrer mais qui est un peu plus cher et qui absorbe globalement moins que les GIK ou Vicoustic. (<https://www.pytaudio.com>)
- Artnovion : <https://www.artnovion.com/categories/2-residential-hi-fi>, qui propose des choses plus esthétiques et qui a un site très bien documenté.
- Sonitus : <http://www.sonitusacoustics.eu/products>
- Skum : <https://www.skumacoustics.com/fr/>

En fait, après avoir fait un premier bilan acoustique, on saura quels sont les objectifs prioritaires à atteindre, et où sont les difficultés principales. On pourra donc choisir les produits adaptés à ces objectifs en regardant les spécifications de chacun des produits et faire une sélection sur des critères techniques et esthétiques.



Certains fabricants donnent plein d'informations (GIK, Artnovion, Vicoustic,...), et il peut être une bonne idée d'aller plutôt chez ceux qui donnent les spécifications plutôt que ceux qui se contentent de clamer une performance « subjective »...

Exemple d'informations, qui renseignent sur les zones d'action (absorption, diffusion) de différents produits, et permettent de choisir en fonction des problèmes rencontrés :





Un point très important, c'est de ne pas oublier le plafond ! C'est encore moins facile à intégrer esthétiquement mais je ne suis pas loin de penser que c'est l'endroit à traiter en priorité, si on peut le faire, surtout si le plafond est bas (<2,50m) ce qui est quand même assez courant...

On détermine l'endroit à traiter au plafond avec la même méthode que pour les murs (avec un miroir) et on vérifie sur l'ETC que ça sert à quelque chose !

Une option pour le plafond qui est, peut-être, plus facilement intégrable, me semble être le film « microsorber » qu'on trouve chez barrisol ou haverkamp.

- [https://www.haverkamp.de/\\_data/downloads/productfiles/Folientechnologie/OPALVARIO/OPALFILM-Whisper\\_OPALWHISPER-en.pdf](https://www.haverkamp.de/_data/downloads/productfiles/Folientechnologie/OPALVARIO/OPALFILM-Whisper_OPALWHISPER-en.pdf)
- <https://microsorber.net/medias/pdf/microsorber-documentation.pdf>

C'est ce qu'a installé Joël Chevassus d'[Audiophile Magazine](#), dans la pièce où il teste les matériels.

Pour ma pièce au sous-sol, comme je n'y connaissais strictement rien, j'ai un peu tout essayé au hasard d'abord, puis avec un peu plus de méthode et en faisant confiance aux mesures pour affiner le placement avec pour objectif d'avoir le moins possible de traitement visible.

Et ce qui s'est révélé être un complément assez efficace (et relativement esthétique, même si c'est très subjectif !), ce sont les plaques de parement sur les murs latéraux.

L'effet sur le RT60 et sur l'ambiance de la pièce est indiscutable. J'ai pu me rendre compte de l'effet immédiat pendant que je posais les plaques de parement. La pièce était totalement vide pendant les travaux, et donc sonnait comme une pièce vide... mais au fur et à mesure que les plaquettes recouvraient les murs, l'impression de vide disparaissait pour laisser une ambiance juste agréable.

Je n'ai pas pu mesurer l'effet des plaquettes seules car j'ai installé les basstraps à membrane en même temps, mais j'estime que cela a contribué à abaisser le RT60 d'environ 0.2s, et j'ai pu me débarrasser d'une bonne partie des GIKs 242 que j'avais utilisés dans la première version du traitement passif de la pièce.

Donc, si c'est une option possible dans le cadre de l'aménagement d'une pièce, les plaquettes de parement me semblent une option économique et favorable acoustiquement.

J'ai utilisé celles-ci, qui sont faciles à poser et à découper :

- [https://www.castorama.fr/plaquette-de-parement-istria-vendue-au-carton/5907762302487\\_CAFR.prd](https://www.castorama.fr/plaquette-de-parement-istria-vendue-au-carton/5907762302487_CAFR.prd)



Mais je pense que la plupart des plaquettes irrégulières en surface doivent produire un effet similaire.

Une fois qu'on a traité les réflexions primaires, le RT60 a déjà dû diminuer et peut-être même se stabiliser sur le spectre au-dessus de 250Hz.

Si ce n'est pas suffisant, il faut rajouter quelques traitements absorbants et/ou diffusants dans la pièce.

L'intérêt de pouvoir mesurer, c'est qu'on peut visualiser l'impact de chaque changement très facilement, et vérifier que l'objectif recherché est bien atteint (ou qu'on est sur la bonne ou la mauvaise voie...).

Personnellement, je commence par ajuster à la mesure sans écouter, puis je prends le temps d'écouter sur la durée (pendant quelques jours), puis j'ajuste à nouveau à la mesure et je procède ainsi par itérations successives, jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant à l'écoute. Cette méthode présente l'avantage d'entraîner l'oreille à reconnaître ce qui influe sur quel paramètre, et à la longue on identifie plus facilement où se trouvent les problèmes.

On se rend ainsi aussi compte qu'il est possible d'obtenir des résultats similaires à la mesure sur le RT60 en utilisant différents produits absorbants et/ou diffusants, mais certains influent aussi significativement sur la réponse amplitude/fréquence et sur la stabilité du RT60 (car certaines fréquences sont absorbées de façon non homogène en fonction du produit) et il est donc utile de regarder l'impact des traitements sur tous les paramètres.

Enfin, et dans tous les cas, au milieu des multiples options possibles, il faudra aussi trouver le bon équilibre entre diffusion et absorption...

Il me semble qu'un bon point de départ puisse être d'absorber derrière les enceintes, et au plafond, et à l'arrière de la pièce.

Sur les murs latéraux aux points de premières réflexions, les 2 options (absorption et diffusion) font du sens, et le tri entre les 2 peut se faire à l'écoute et en regardant l'impact sur la réponse amplitude/fréquence.

On peut aussi diffuser entre les enceintes, ce qui peut être utile si la dispersion polaire de ses enceintes est large et qu'elles sont pincées significativement vers le point d'écoute.

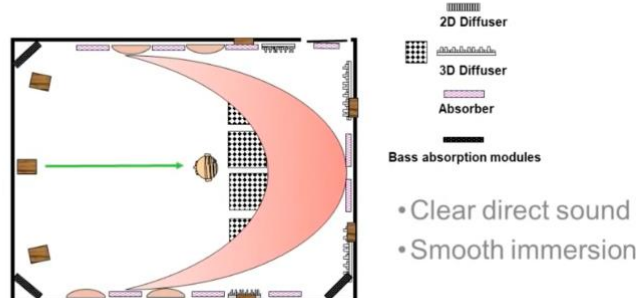
Les **recommandations d'experts sur internet** sont aussi des sources d'idées intéressantes. Notamment, ces **vidéos d'Anthony Grimani**, qui même si elles sont très orientées Home Cinema, posent les principes essentiels, d'un traitement passif.

- <https://youtu.be/raAyF5ksbkk>
- <https://www.youtube.com/watch?v=G0ekssXX7rE>

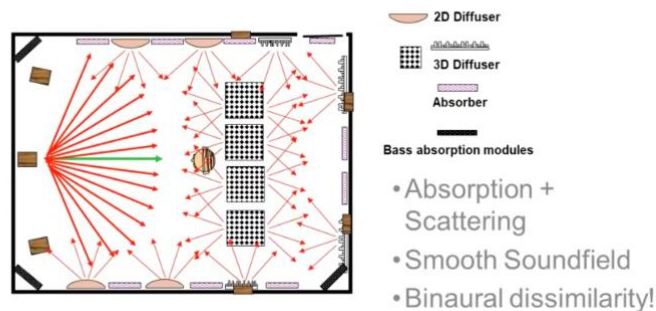


Les principes essentiels recommandés dans ces 2 vidéos peuvent être résumés avec quelques planches extraites des vidéos :

### Soundfield Perception – What do we want?!



### Soundfield Perception – How we get there



### Reflection Decay Time Getting it right

- ... Simply use these guidelines:
  - Cover 15% of the wall surfaces with absorption!
  - Cover 15% with diffusion
    - 2D towards front – 3D towards back
  - Spread absorption materials around the room surfaces
  - Interleave absorption and diffusion
  - Asymmetrical layouts can be better!!

### Reflection Decay Time Getting it right

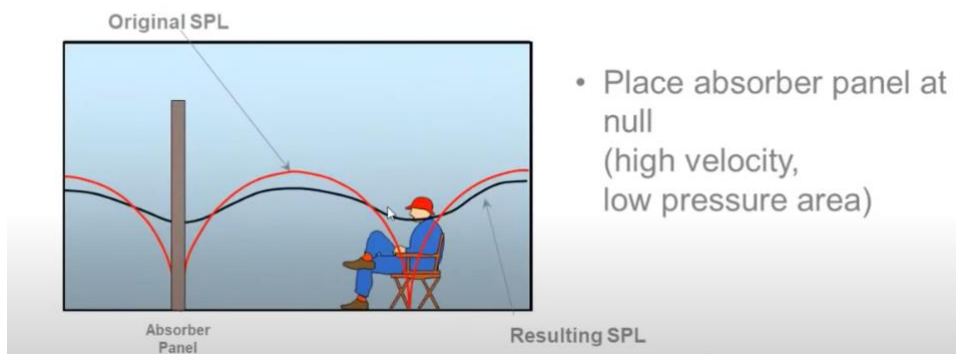
- Also treat ceiling first reflection
- Diffusion smooths out decay
- Bass absorption too
  - Balance Reflected Spectrum
- Diffusion enhances absorption effectiveness
  - May need to reduce absorption a bit



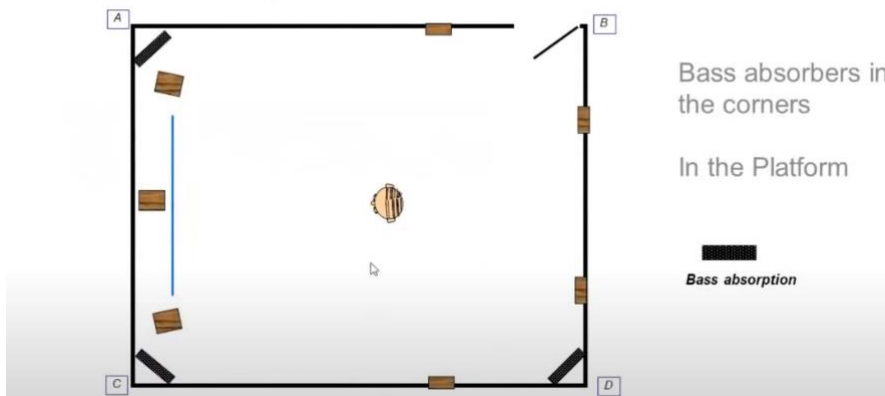
## Low Frequency Absorption

- Two Purposes:
  - Low Frequency Reflection Decay Time (RDT) control
    - Down to 200Hz
- Standing wave resonance damping
  - 30Hz to 200Hz

### Solutions to Standing Waves Absorption at Standing Wave Null

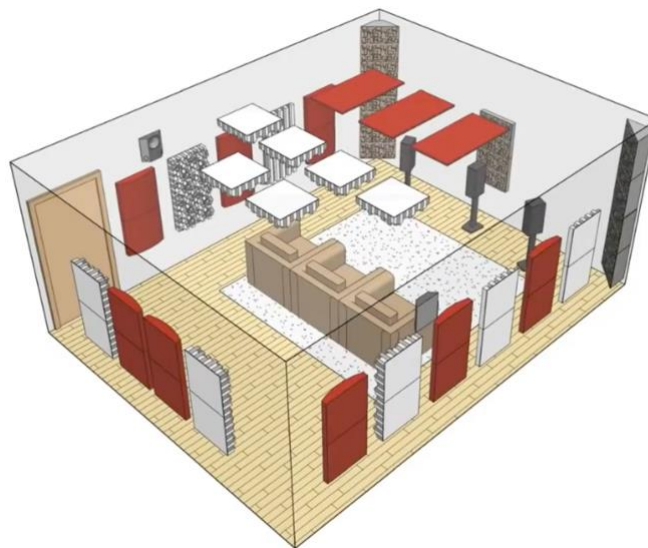
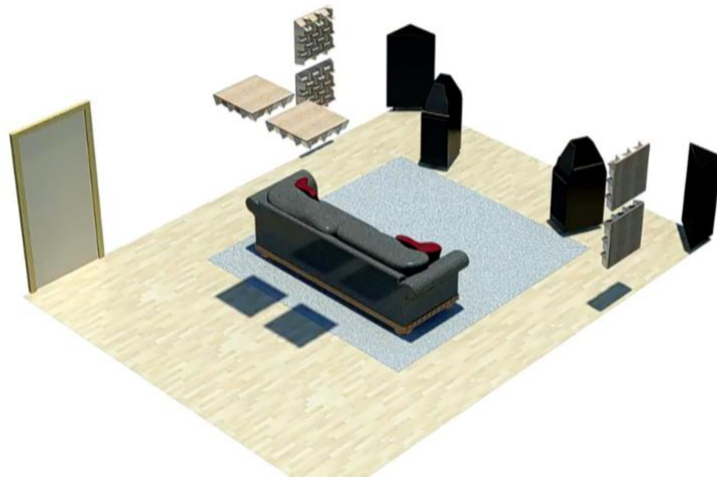


### Acoustics Recipe – Bass Absorbers





Et ci-dessous, pour ceux qui pourront s'en inspirer, une salle Hifi traitée au « minimum » selon « Grimani », et une salle Home Cinema traitée selon les règles de l'art « Grimani » !



Et, dans tous les cas, à la fin, **lorsqu'on a un doute, c'est facile, il suffit de suivre les recommandations de ses oreilles !**

Evidemment, on finit toujours par faire avec ce qu'on peut intégrer dans sa pièce, mais c'est, à mon avis, tout l'intérêt de pouvoir mesurer ce qu'on fait, car on peut ainsi ne mettre que le minimum acceptable et au meilleur (plus efficace) endroit.



## Actions sur les ondes stationnaires :

Les ondes stationnaires sont le problème le plus compliqué à traiter, car aucun traitement passif qu'on trouve sur le marché n'est réellement efficace en dessous de 80Hz (voire même 100Hz) quoi qu'en dise le marketing des fabricants !

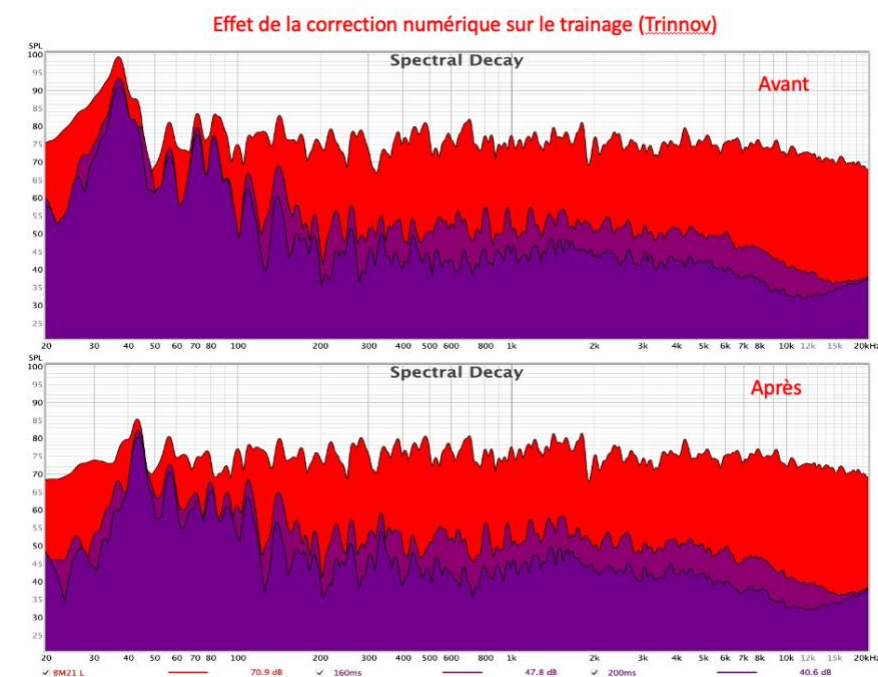
Donc sauf à pouvoir installer une très grande profondeur (1m ou plus) de matériau absorbant derrière les enceintes, on n'arrivera pas à traiter le problème. Et si on a une pièce de dimensions modestes, l'affaire est réglée pour ce type de solutions de toutes façons...

A mon avis, il n'y a que 2 solutions efficaces et qui soient également « compactes ».

**La première solution**, c'est la correction numérique pour laquelle on a un grand nombre d'options entre les solutions « tout intégré » (Trinnov, ou Lyngdorf par exemple) et les solutions entièrement manuelles (RePhase), en passant par diverses options plus ou moins automatiques (Dirac Live, Acourate, Home Audio Fidelity, ...). J'ai pu mettre en œuvre chez moi, Trinnov (Amethyst), Dirac Live qui donnent des résultats très similaires, et j'ai aussi longtemps utilisé RePhase qui produit un résultat au niveau des meilleures solutions, tout en étant entièrement paramétrable et ajustable au strict nécessaire.

L'avantage de la correction numérique sur les problèmes acoustiques d'une pièce, c'est le traitement efficace, et rapide, des pics d'amplitude dans la zone modale. Par contre, cela n'a qu'un effet très limité sur le trainage des fréquences modales, et ça n'a aucun effet sur la réverbération (donc aucune amélioration possible sur le RT60). Elle sera donc utile lorsque les fréquences modales sont très marquées et gênantes, et qu'on ne peut mettre en œuvre une solution passive.

*A titre d'illustration, voici ci-dessous, un graphe montrant l'efficacité évidente d'un Trinnov Amethyst sur l'amplitude des fréquences modales, et inversement la faible efficacité sur le trainage...*





Par ailleurs, **le principe de la correction numérique des problèmes acoustiques** d'une pièce, **consiste** à anticiper les problèmes générés par la combinaison du champ direct et des réflexions, et **à modifier le champ direct** de façon à ce que, lors de sa combinaison avec les réflexions, ces problèmes soient éliminés ou au moins très atténués.

Ainsi, les ondes stationnaires verront leur amplitude réduite puisque l'intensité du champ direct aura été atténuée sur les fréquences modales.

Or, comme on l'a vu, **le champ direct, et le champ réverbéré interviennent à des moments différents dans la création de la performance enregistrée par nos oreilles+cerveau.**

**Donc la modification du champ direct ne peut pas être pas totalement neutre** dans ce processus, et **la mise en œuvre d'une correction numérique sera donc toujours une affaire de compromis** entre les avantages procurés par une réduction des problèmes de la zone modale, et les inconvénients d'un champ direct modifié...

**La deuxième solution**, c'est le traitement passif, et le seul que j'ai trouvé qui marche vraiment, et qui est suffisamment « compact » pour être intégrable dans une pièce de dimensions modestes, ce sont les basstraps à membrane (ou panneaux fléchissants), à la mode Jipihorn.

Ça ne demande qu'environ 15 à 30cm de profondeur (au choix), et ça peut être installé sur la totalité du mur derrière les enceintes (sous réserve évidemment que celui-ci soit disponible et sans fenêtre).

Jipihorn a documenté la construction de ces panneaux dans sa propre pièce mais est resté sur des considérations non chiffrées de l'amélioration apportée. On peut lire ce qu'il propose ici, et voir une vidéo de la construction.

- <https://jipihorn.wordpress.com/2010/03/22/le-bass-trap-dans-la-vraie-vie/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=il4cZSP4xmw>

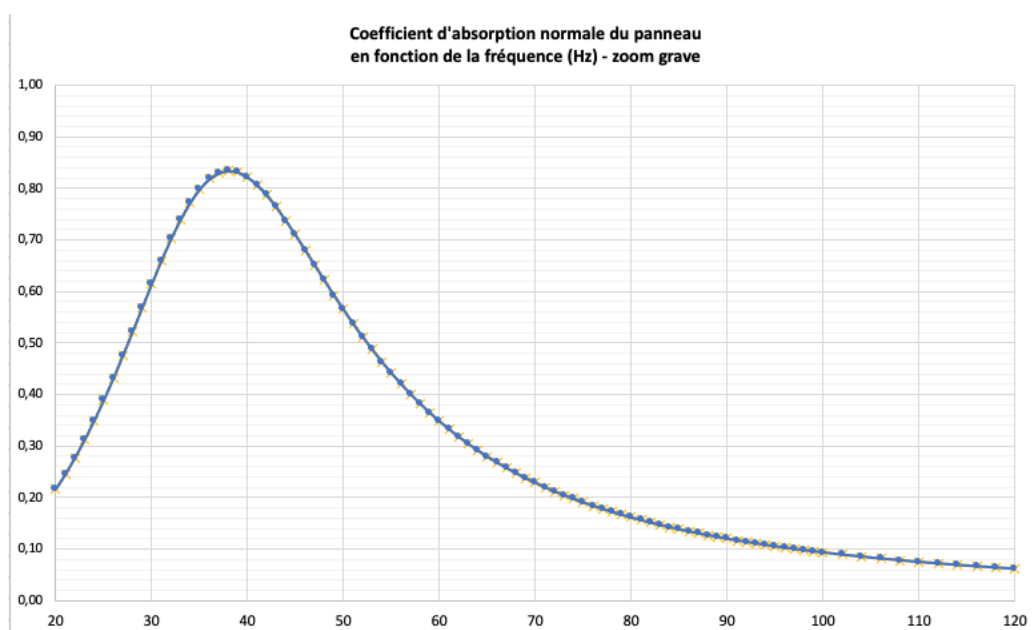


Par ailleurs, la théorie acoustique explique bien le principe de ces panneaux et des simulateurs existent (voir par exemple: <http://www.acoustic.ua/recommandations/800#4>), mais aucun ne permet d'anticiper la réduction effective (en dB) qu'on pourrait en attendre, qui est de toute façons proportionnelle à la surface des panneaux.

Par contre, alec\_eiffel, sur le forum Hifi indépendant, a développé un modèle sur un fichier excel qui donne de très bons résultats. On peut le trouver ici : <http://forum-hifi.fr/thread-9175.html>.

Pour le basstrap que j'ai installé, ce modèle donne une estimation assez proche de ce qu'on mesure effectivement. Il me semble donc être une bonne base de départ pour dimensionner ce type de basstrap.

Paramètres à saisir : fond gris		Courbe 1
<b>Largeur</b>	X =	1,16
<b>Hauteur</b>	Y =	2
<b>Epaisseur panneau</b>	h =	10
<b>Profondeur cavité</b>	d =	0,29
Masse supplémentaire	m_sup	3,00
Masse volumique	rhonu =	500
Coefficient de Poisson	nu =	0,07
Module d'Young	E =	5,5
<b>Type calculé</b>	<b>Type =</b>	<b>posé</b>
<b>Résistivité amortissant</b>	<b>sigma =</b>	<b>4 000</b>
<b>Profondeur amortissant au fond</b>	<b>d1 =</b>	
<b>Pas entre trous (disposés en carrés)</b>	<b>b =</b>	
<b>Diamètre des trous</b>	<b>2a =</b>	
<b>Taux de perforation (calculé )</b>	<b>eps =</b>	
Température pièce	T =	22
Résistance structure/fuites	R =	600
<b>Type de panneau</b>		<b>posé</b>
<b>Maximum d'absorption</b>		<b>38 Hz</b>





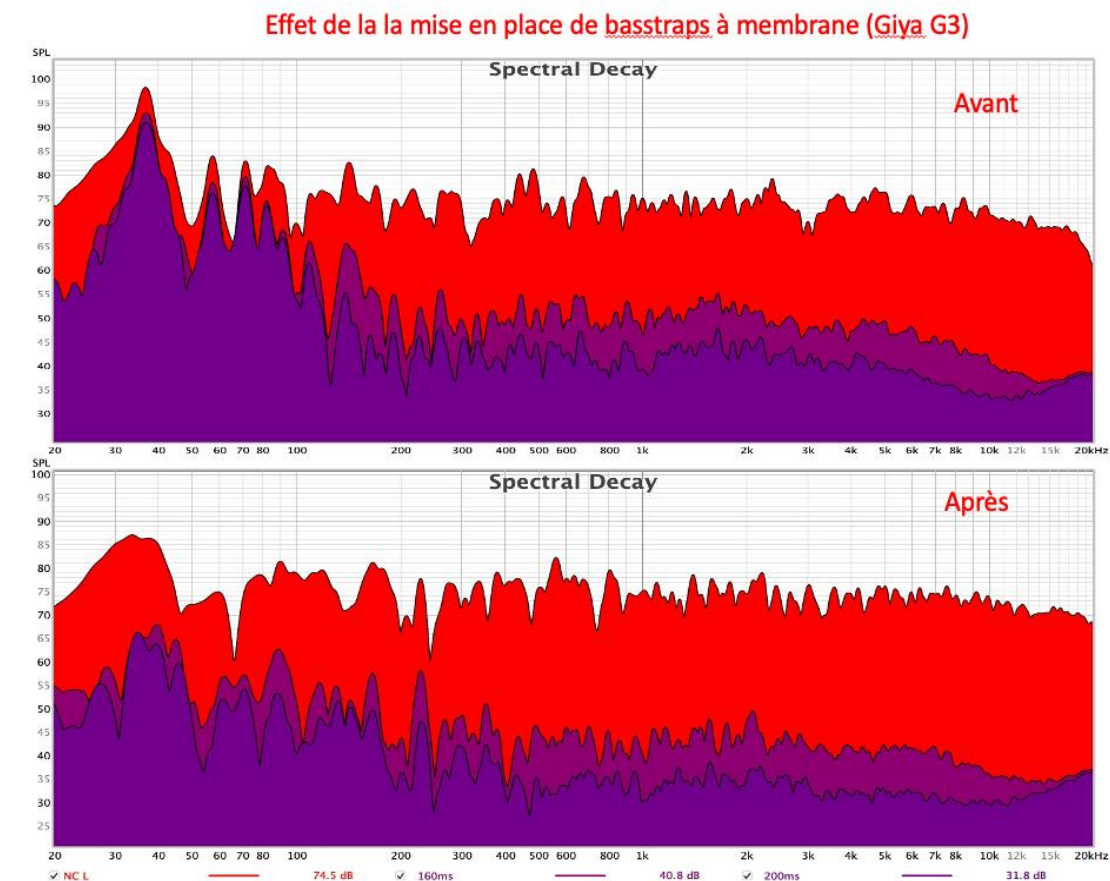
Bref, j'ai donc testé et mesuré et j'ai déjà publié les résultats les plus significatifs dans mon sous-sol sur le Forum Indépendant de la Hifi et des Audiophiles, ici :

- <http://forum-hifi.fr/thread-542-post-144799.html? - pid144799>
- <http://forum-hifi.fr/thread-542-post-144913.html? - pid144913>
- <http://forum-hifi.fr/thread-542-post-145860.html? - pid145860>
- <http://forum-hifi.fr/thread-542-post-155885.html? - pid155885>

Pour faire simple et court, un fait est indéniable, c'est que ça marche très bien ! Seul inconvénient, ce n'est pas applicable partout, car il vaut mieux avoir une pièce dédiée pour cela. Mais c'est un bon complément de la correction numérique car cela permet d'en diminuer l'utilisation au strict minimum, et surtout, cela traite bien le trainage !

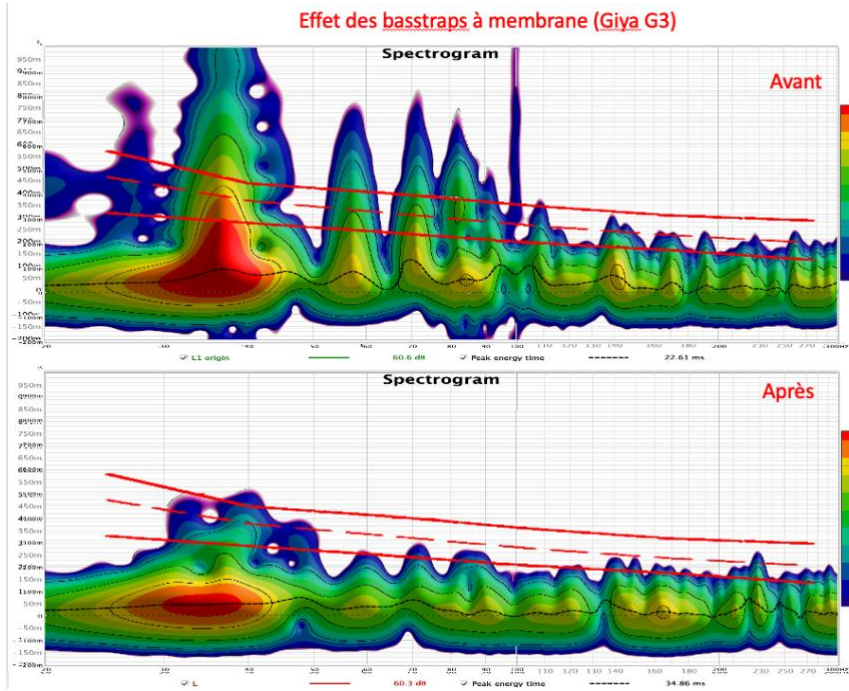
Et pour ceux qui n'auraient pas le courage de lire tous les liens, voici en quelques graphes ce que peuvent apporter les basstraps à membrane, sur le Decay, sur le Spectrogram et sur l'amplitude.

Et à l'écoute, l'amélioration de la lisibilité, de la définition et de l'articulation du grave est juste aussi spectaculaire que l'amélioration des mesures. La réduction du trainage en particulier, est un élément déterminant de l'amélioration perçue.





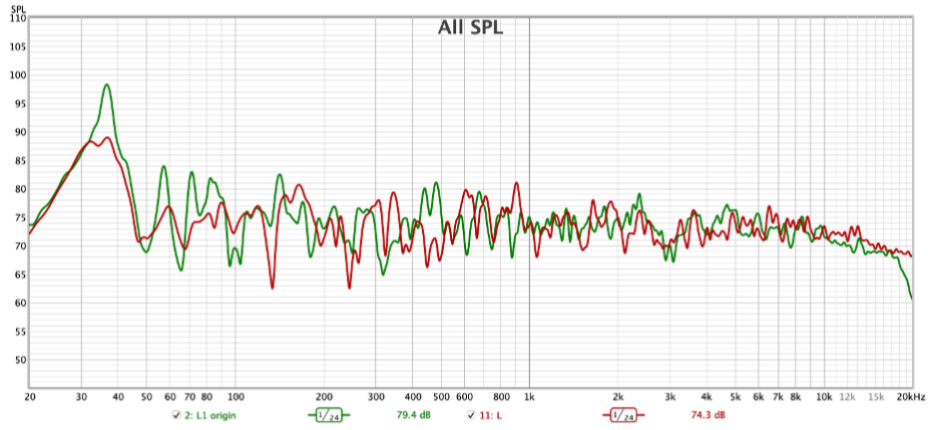
Effet des basstraps à membrane (Giya G3)



Amplitude au sweet spot (voie gauche)

Avant: Vert

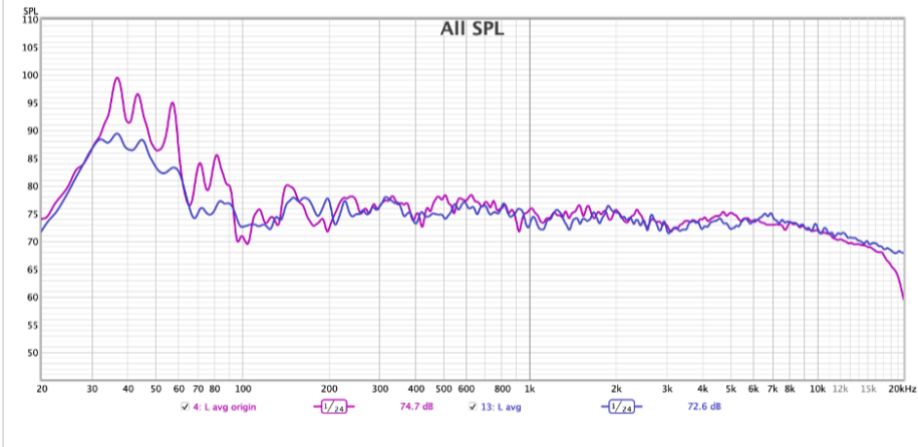
Après : Rouge



Amplitude moyenne 9 points (voie gauche)

Avant: Violet

Après : Bleu





## Actions sur la phase :

Comme indiqué précédemment, il n'y a que la correction numérique qui permet de régler ce paramètre de façon efficace, sauf, bien évidemment, à changer d'enceintes pour un modèle dont les HP sont en phase par design (exemple Leedh E2).

Les solutions type Trinnov, Dirac Live, Acourate et HAF corrigent parfaitement la phase en automatique (c'est à dire qu'on n'a pas à s'en préoccuper puisque c'est fait par le logiciel en même temps que la correction d'amplitude). Le résultat obtenu est remarquable.

Attention cependant, certains logiciels de correction numérique (tels Mathaudio, mais aussi Lyngdorf) ne corrigent pas la phase et se contentent de corriger l'amplitude. Ce n'est pas critiquable en soi, mais autant le savoir, car la documentation associée est pour le moins ambiguë (pour ne pas dire erronée).

RePhase, permet de choisir la correction à appliquer, tant sur la phase que sur l'amplitude. C'est la solution la plus économique et la plus souple, mais elle demande un peu d'investissement personnel pour obtenir un bon résultat.

Voir le tuto RePhase pour plus d'explications. (Ci-après le lien vers le [Tutoriel RePhase](#)).



## Tableau de Synthèse et Grille d'évaluation subjective

On trouvera ci-après un tableau « synthétique » qui résume le lien entre les critères audiophiles et les paramètres acoustiques qu'on peut mesurer. Ce tableau ne concerne que l'impact lié aux interactions entre la pièce d'écoute et les enceintes, et il est évident que la qualité du matériel en amont compte également dans la performance globale du système (le champ direct, notamment, ne dépendant que de cette performance).

Et comme toute évaluation est subjective et personnelle, il me paraît aussi intéressant de partager une échelle de mesure « subjective » que je trouve utile car elle évite, lorsqu'on l'utilise de façon « objective », les excès d'enthousiasme, assez courants chez certains audiophiles, lorsqu'ils installent un nouveau câble, un nouvel appareil, ou un autre grigri à effet « surlecutant », et permet de relativiser l'ampleur de chaque progrès réalisé, par rapport à d'autres changements possibles sur le système.

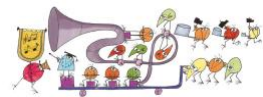
**Dans tous les cas, et à mon humble avis, chaque progrès que l'on pourra obtenir en s'occupant des paramètres acoustiques de sa pièce, sera, sans ambiguïté, de niveau 6 sur l'échelle ci-après !**

Cette échelle est ma libre traduction de celle de d'Arthur Salvatore que l'on trouve sur son blog, très intéressant par ailleurs. <http://www.high-endaudio.com/philos.html>

Echelle	<a href="http://www.high-endaudio.com/philos.html#Levels">origine: Arthur Salvatore: http://www.high-endaudio.com/philos.html#Levels</a>
Niveau	Effets Audibles
7	L'amélioration est " <b>transformationnelle</b> "; ce qui signifie non seulement qu'il serait complètement impensable de s'en passer, mais l'amélioration modifie en fait la pensée et la perspective d'un audiophile à la fois sur son système particulier et sur "Audio" en général. C'est en quelque sorte le rêve absolu de l'audiophile.
6	L'amélioration est plus que significative ou évidente, <b>elle est "énorme"</b> . <b>C'est le type d'amélioration que tout audiophile recherche</b> , et dont il est impossible de se passer après l'avoir expérimentée. Ce type d'amélioration est fréquent chez les audiophiles qui débutent, puis devient plus rare au fur et à mesure que que l'expérience et la qualité du système augmente.
5	L'amélioration peut être <b>entendue à tout moment par toute personne ayant une audition saine, y compris les auditeurs sans intérêt pour la qualité du son</b> . L'amélioration est désormais toujours "significative"; ce qui signifie qu'un audiophile ne peut plus profiter de son système sans cette amélioration spécifique.
4	L'amélioration peut être <b>entendue tout le temps, et sans aucun effort, par un audiophile</b> . Cependant, il ne serait pas inhabituel qu'il ne soit pas entendu par les auditeurs sans intérêt pour la qualité sonore. Cette amélioration est encore généralement «significative»; ce qui signifie qu'un audiophile souffrira presque toujours de son absence.
3	L'amélioration peut être <b>entendue longuement, mais principalement uniquement lorsque vous faites un effort pour l'écouter spécifiquement</b> , donc ce n'est pas "évident". Cette amélioration n'est généralement pas "significative"; ce qui signifie qu'il y a de bonnes chances qu'un audiophile puisse supprimer cette amélioration de son système et ne souffre toujours pas de son absence.
2	L'amélioration peut être <b>entendue lors de la commutation des composants et lors du retour</b> , mais elle n'est <b>plus entendue après une très courte période de temps</b> ; parfois quelques secondes, mais presque toujours moins d'une minute.
1	L'amélioration peut être subtilement, mais toujours uniformément, <b>entendue lors du passage à la composante supérieure (A/B)</b> , mais elle n'est <b>pas entendue lors du retour (B/A)</b> .

## Tableau de Synthèse – Guide Acoustique

Critère "Audiophile"	Phénomènes physiques et Psycho-acoustiques liés à l'interaction avec la pièce d'écoute	Paramètre Acoustique mesuré
<p style="text-align: center;"><b>Qualité des timbres</b></p> <p style="text-align: center;">Intelligibilité des paroles, Lisibilité des pupitres, Définition.</p>	<p>Champ réverbéré cohérent fréquentiellement avec Champ direct</p>	<p>RT60 stable sur la plage 200Hz-8000Hz</p> <p>RT60, T20, T30, EDT identiques à +/- 25%</p> <p>Decay homogène sur l'ensemble du spectre au-delà de 80ms</p> <p>Spectrogram régulier/homogène entre 300Hz et 20000Hz</p> <p>Décroissance homogène de l'ETC sur fréquences clés de 0ms à 40ms</p>
<p style="text-align: center;"><b>Qualité de l'image (largeur, profondeur, précision, netteté)</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Définition, Transparence</b></p> <p style="text-align: center;">Espace/Air entre les instruments et solistes</p> <p style="text-align: center;">Crédibilité et Impression d'être transporté sur le lieu d'enregistrement ou bien que ce sont les musiciens qui sont transportés chez soi.</p>	<p>Niveau sonore (dB) des réflexions primaires du local d'écoute cohérente avec l'Initial Time Delay (ITD) du local d'enregistrement.</p>	<p>ETC avant 40ms cohérent avec la cible d'intensité maximale</p>
<p>Son « analogique », Filé et douceur des aigus.</p> <p>Absence de duretés « numériques »</p>	<p>Décroissance régulière de l'intensité des réflexions tardives du local d'écoute.</p>	<p>ETC après 40ms cohérent avec la cible d'intensité maximale</p>
<p>Sensation d'espace, d'aération de la scène sonore</p> <p style="text-align: center;"><b>Vie de la musique</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Définition, Transparence</b></p>	<p>"Sweet-Spot" placé proche de la distance critique</p>	<p>Calcul de la distance critique</p>
<p><b>Dynamique (micro et macro), Intelligibilité et lisibilité.</b></p> <p style="text-align: center;">Qualité des attaques de notes et des extinctions des notes</p>	<p>Temps de réverbération (RT60) cohérent avec dimensions de la pièce d'écoute.</p>	<p>Calcul du RT60 cible en fonction des dimensions de la pièce d'écoute</p>
<p><b>Dynamique (micro et macro), Lisibilité.</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Articulation et Impact/rapidité/netteté des basses</b></p> <p style="text-align: center;">Qualité du rendu du pincé des cordes, et de la peau des percussions</p>	<p>Trainage des fréquences modales maîtrisé</p>	<p>Spectrogram cohérent avec la cible entre 20Hz et 300Hz</p> <p>Atténuation du Decay &gt;20dB après 160ms</p>
<p><b>Dynamique, Définition</b></p>	<p>Fréquences modales maîtrisées en amplitude</p>	<p>Courbe Amplitude/Fréquences respectant les critères cible, ou, au minimum, sur les pics d'amplitude.</p>



## Quelques considérations personnelles

Pour terminer ce document, je voudrais partager une conviction qui n'est qu'une opinion, donc forcément subjective et non mesurable, mais que je me suis forgé tout au long de la mise au point de mon système dans une pièce difficile acoustiquement.

En fait, lorsqu'on cherche à améliorer son système, on cherche surtout à reproduire la musique réelle, celle que l'on peut entendre dans la vraie vie, avec de vrais instruments. Or cette quête est juste impossible car comment reproduire, par exemple, la puissance, l'ampleur, la sensation d'espace et de dynamique illimitée d'un orchestre symphonique chez soi, dans 20m<sup>2</sup> (ou même 60m<sup>2</sup>) ? Et même de petits ensembles, ou un simple interprète enregistré dans un lieu intimiste, est un challenge qui n'est pas vraiment facile à atteindre, même avec des moyens importants.

Pourtant, je suis persuadé que ce qu'un système hifi, bien mis au point, peut faire, c'est **recréer la même expérience émotionnelle que celle que l'on ressent devant la musique live**, ce frisson qui parcourt l'échine, ou les poils qui se dressent sur les bras, lorsqu'on est touché par la musique !

Et pour que cette émotion passe, je suis maintenant convaincu qu'il est impératif que certains fondamentaux soient présents, et surtout :

- La dynamique et,
- Les timbres.

Si ces 2 facteurs sont altérés d'une façon ou d'une autre, il est difficile de se laisser happer par la musique et d'oublier que l'on est simplement en face d'un système hifi...

Et, comme expliqué dans ce document, la pièce et son interaction avec le système, ont un rôle extrêmement important sur ces 2 facteurs.

- La dynamique, peut être compressée dans le grave par l'ampleur des fréquences modales, mais aussi dans les médiums/aigus par un RT60 trop élevé vs les dimensions de la pièce d'écoute.
- Et la qualité des timbres peut être sévèrement altérée par un décalage fréquentiel important entre le champ direct et le champ réverbéré.

Toutes les améliorations, même mineures en apparence, sur chacun de ces paramètres, apportera un peu plus de cette touche d'émotion qui est l'essence même de la musique !

Bon courage à tous ceux qui essayeront de suivre ces quelques idées, et bonne musique à tous !



Les devises Shadok

JE DIS DES CHOSES  
TELLEMENT  
INTELLIGENTES  
QUE, LE PLUS  
SOUVENT, JE  
COMPRENDS PAS  
CE QUE  
JE DIS.



Et pour ceux qui n'auraient pas tout lu :

### Le résumé

*Mais c'est pas bien, de pas avoir tout lu !*

Si l'obtention de « bonnes » mesures n'est pas une condition suffisante pour avoir un résultat excellent, **c'est une condition nécessaire** pour qu'un système puisse délivrer tout son potentiel sur la dynamique, les timbres, la définition, la transparence, l'image, ...



## Annexe 1 : Exemples d'utilisation de l'ETC

Pour « voir » ce qu'il se passe avec les réflexions, il faut utiliser le graphe ETC (Energy Time Curve). Comme indiqué précédemment, ce graphe (fourni automatiquement par REW) donne l'évolution temporelle de l'énergie dans la pièce. On n'a pas de visibilité directe sur le contenu fréquentiel de cette énergie, mais on a une mesure de l'intensité globale et de son évolution dans le temps.

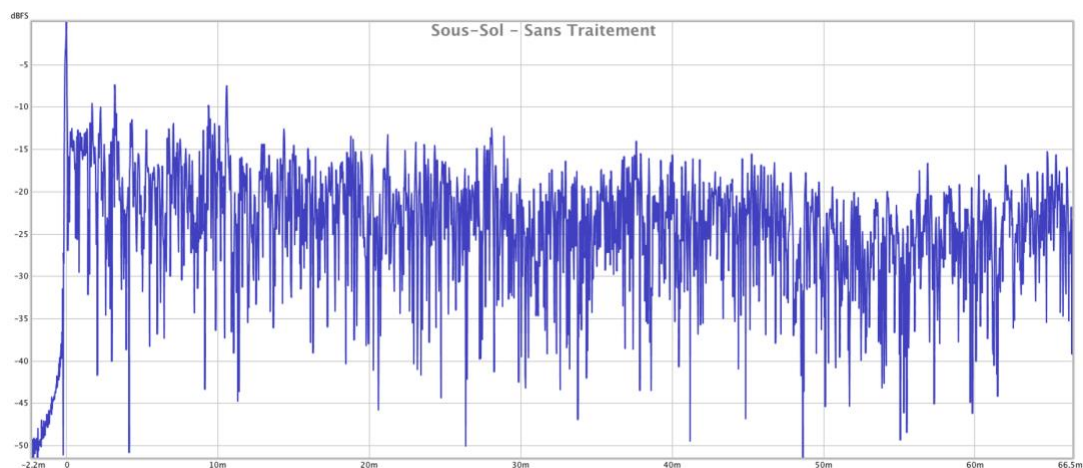
L'intérêt de cette mesure est qu'on voit l'impulsion initiale au temps 0 qui monte à 0dB, puis on voit ce qu'il se passe dans les millisecondes qui suivent.

Dans une pièce anéchoïque (sans réflexions), on aurait une décroissance rapide et aucun « rebond », mais dans une pièce normale, on va « voir » la quasi totalité des obstacles rencontrés dans la pièce.

Pour bien comprendre comment « lire » ce graphe, il faut avoir à l'esprit que le temps 0, c'est le moment où le micro reçoit le signal provenant des enceintes. Si ce micro est à 3m des enceintes (en position d'écoute), le signal a été émis 10ms plus tôt (soit le temps mis par le son pour parcourir les 3m de distance).

On voit donc sur le graphe au temps 0, un pic d'impulsion à 0db, suivi d'une décroissance rapide, puis des tas d'oscillations qui sont les bruits « parasites » émis en même temps que l'impulsion, puis les premières réflexions sur les obstacles divers (plafond, sol, murs, meubles, autres objets divers, etc...) qui arrivent au fur et à mesure sur le micro.

La première fois qu'on regarde un graphe ETC, on se dit qu'on ferait mieux d'aller écouter de la musique car ça paraît franchement illisible et pas passionnant du tout. Exemple :

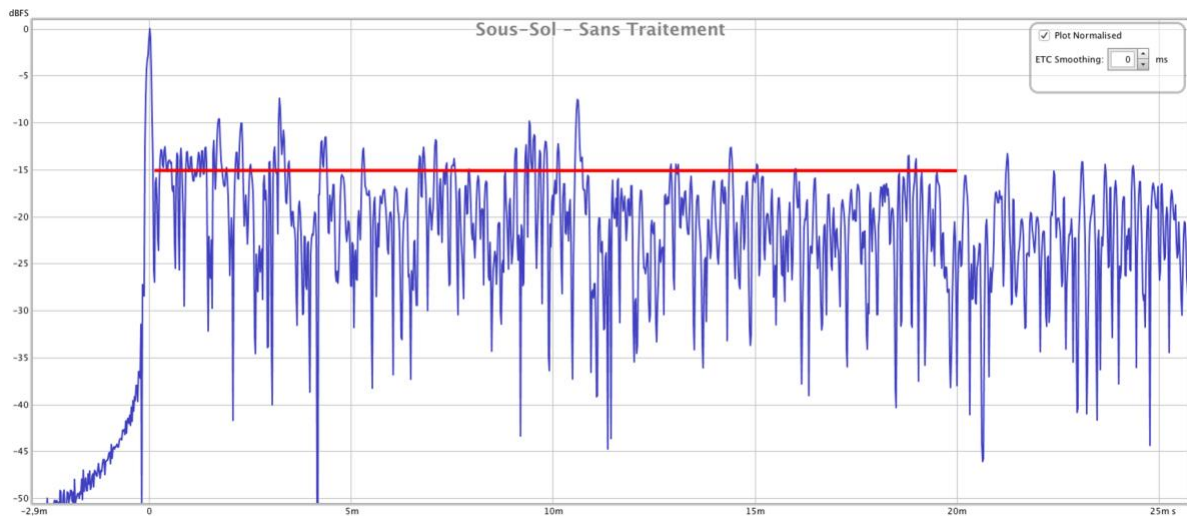


Néanmoins, pour ce qui nous occupe ici, ce graphe est très intéressant, surtout lorsqu'on s'intéresse aux premières 20ms et qu'on regarde ce qui dépasse les -15db ou -20dB d'atténuation.

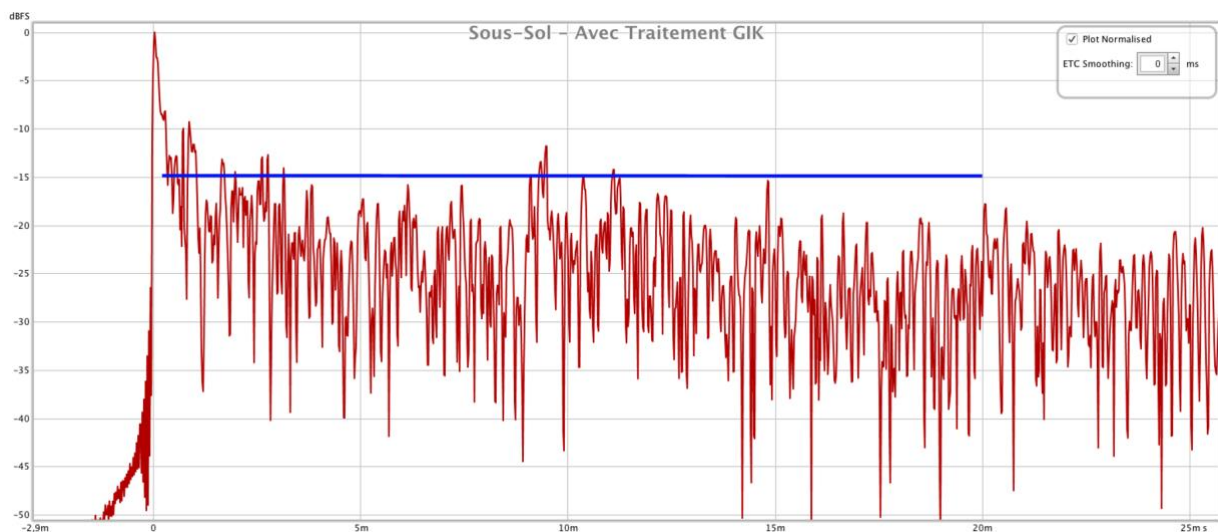


Voici successivement ce qu'il se passe sur l'ETC dans mon sous-sol en fonction des différents aménagements.

*1- Aucun traitement et placement des enceintes et de la position d'écoute initiaux.*



*2- Ajout du traitement passif GIK posé aux premières réflexions (mur gauche enceinte gauche, mur droit enceinte droite, sol (moquette), plafond (GIK))*



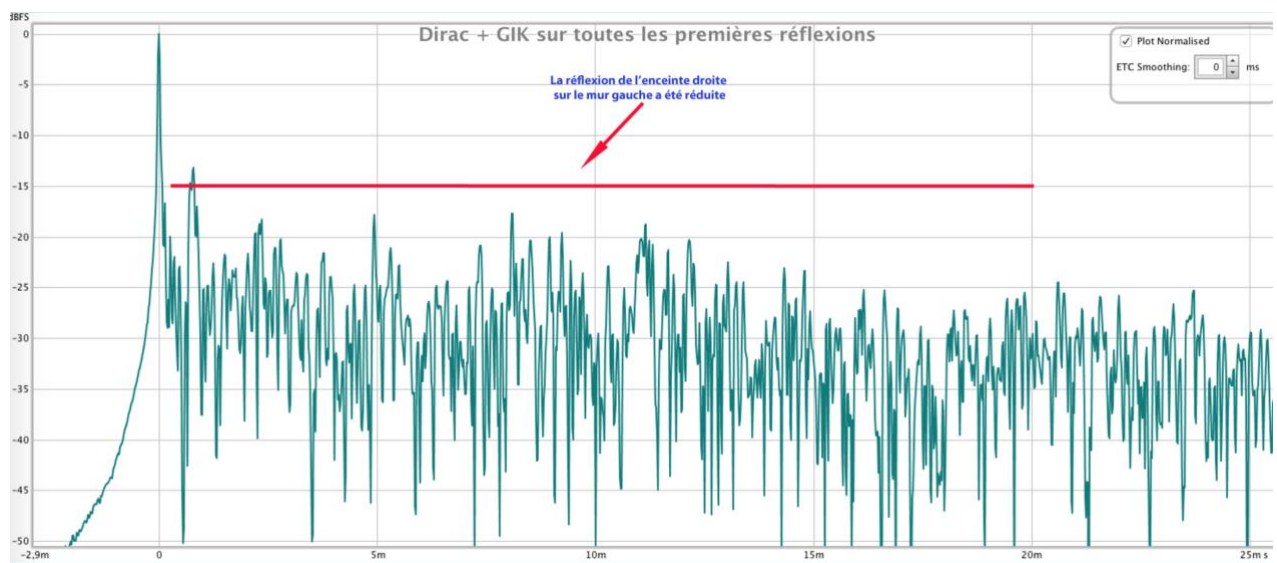
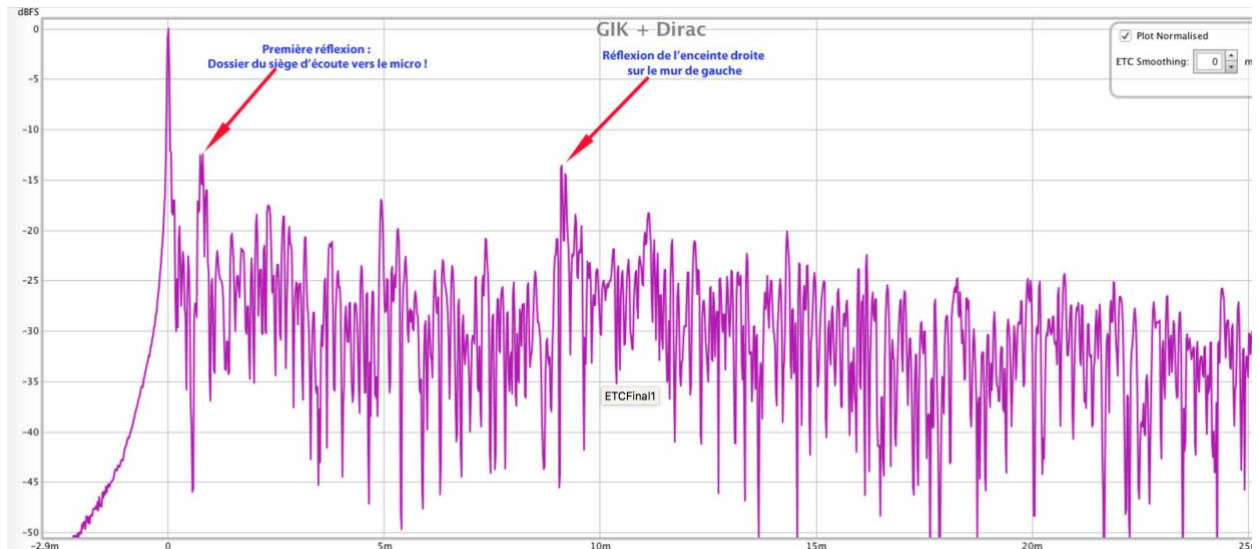
On voit que l'absorption aux premières réflexions est efficace, mais il reste des pics qui dépassent les -15dB dans la zone des 20ms.

Le pic existant à 0,9ms est dû au dossier du siège d'écoute qui renvoie le signal sur le micro (15cm dans un sens, + 15cm dans l'autre = 0,9ms). Sans le siège ce pic n'existe pas, et donc c'est bien le dossier.

Enfin, le dernier pic ennuyeux aux environs de 9ms, soit 2,9m de distance supplémentaire vs le son direct, correspond à la réflexion de l'enceinte gauche sur le mur de droite (et réciproquement) qui n'était pas traitée.



En plaçant un GIK 242 que j'avais à l'arrière de la salle sur cet emplacement latéral, on fait disparaître ce pic (au détriment d'une petite remontée vers 7ms qui correspond à la réflexion à l'arrière de la pièce qui n'est plus traitée, car je n'avais pas assez de GIK pour en mettre partout...).

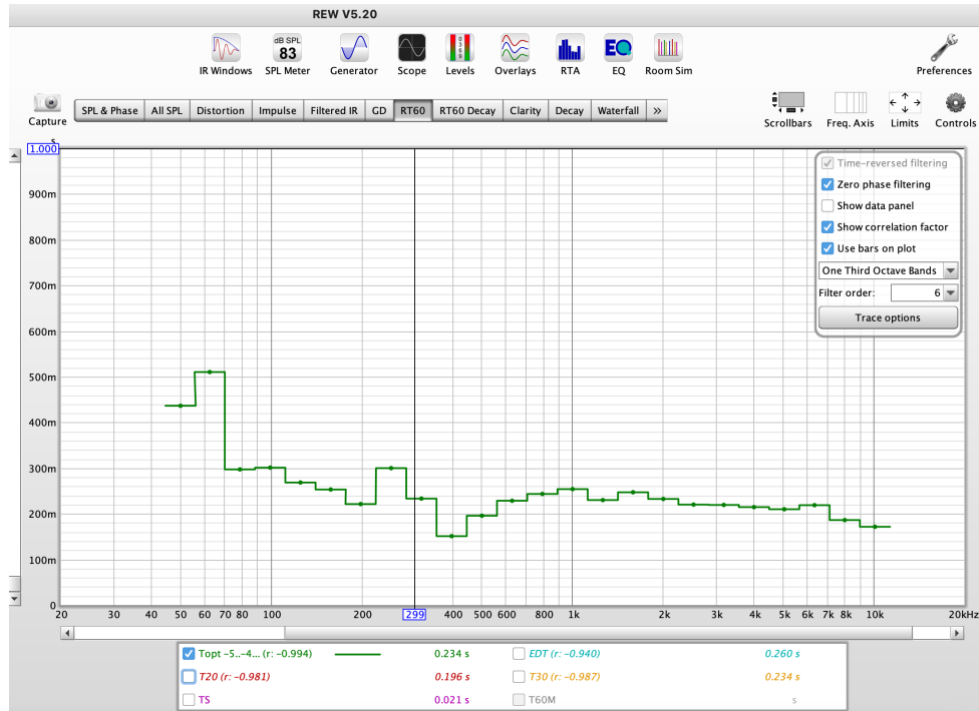


Bref, en conclusion, avec l'ETC, on peut « voir » où il faut traiter et on peut « voir » si le traitement appliqué marche, et ainsi augmenter l'efficacité du traitement en le disposant aux meilleurs endroits.

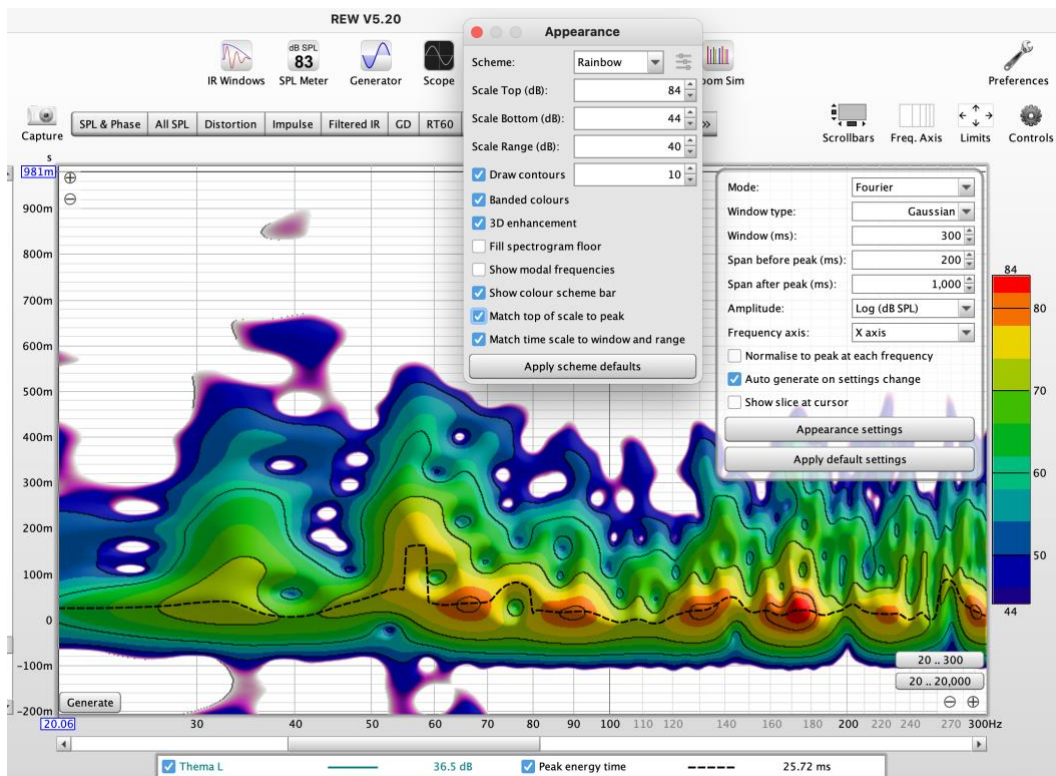


## Annexe 2 : Réglages affichages graphes de REW

### Réglages RT60 :



### Réglages Spectrogram (Mode Fourier) :

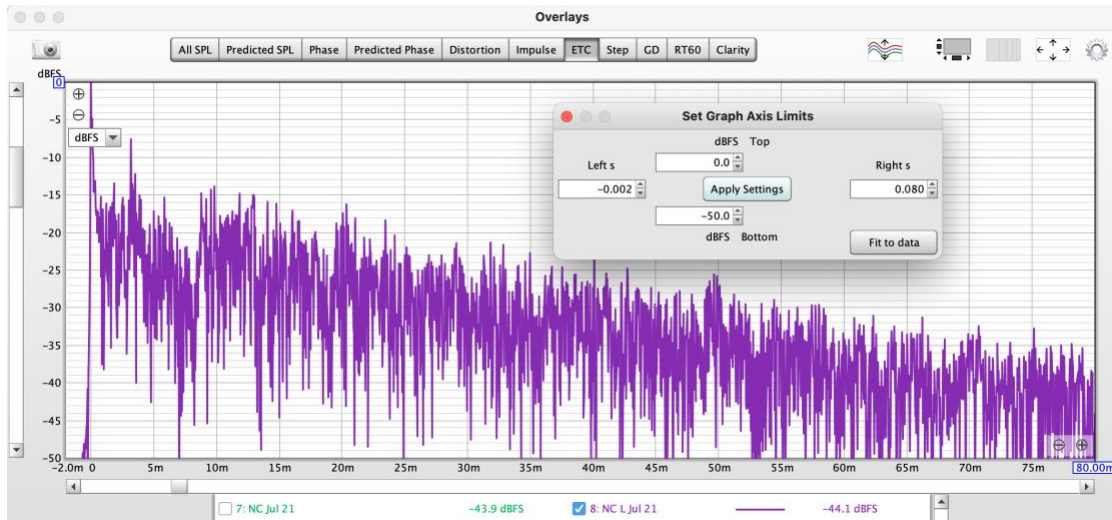




## Réglages ETC :

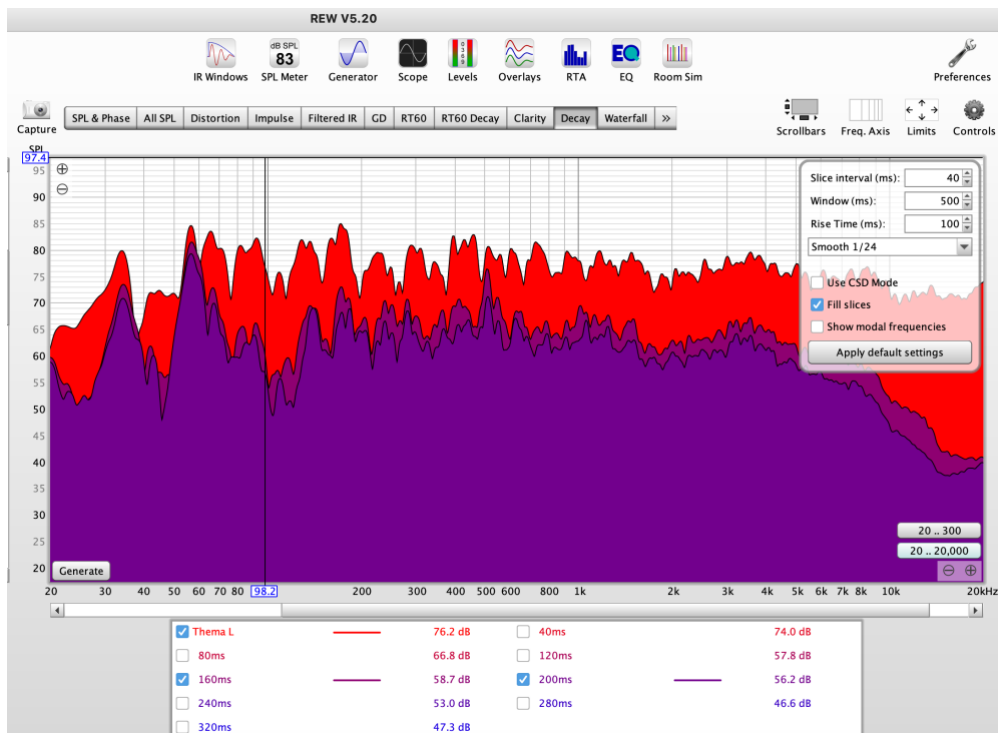
L'onglet ETC se trouve sur la fenêtre Overlays.

(Attention à ne pas oublier de sélectionner dBFS dans la case en haut à gauche, si on veut obtenir cet affichage).



## Réglages Decay :

Attention : il peut être utile, pour la lisibilité, de désélectionner tous les temps sauf 160ms et 200ms dans la légende sous le graphique. On peut aussi décocher « Fill Slices » pour une lecture moins « chargée ».





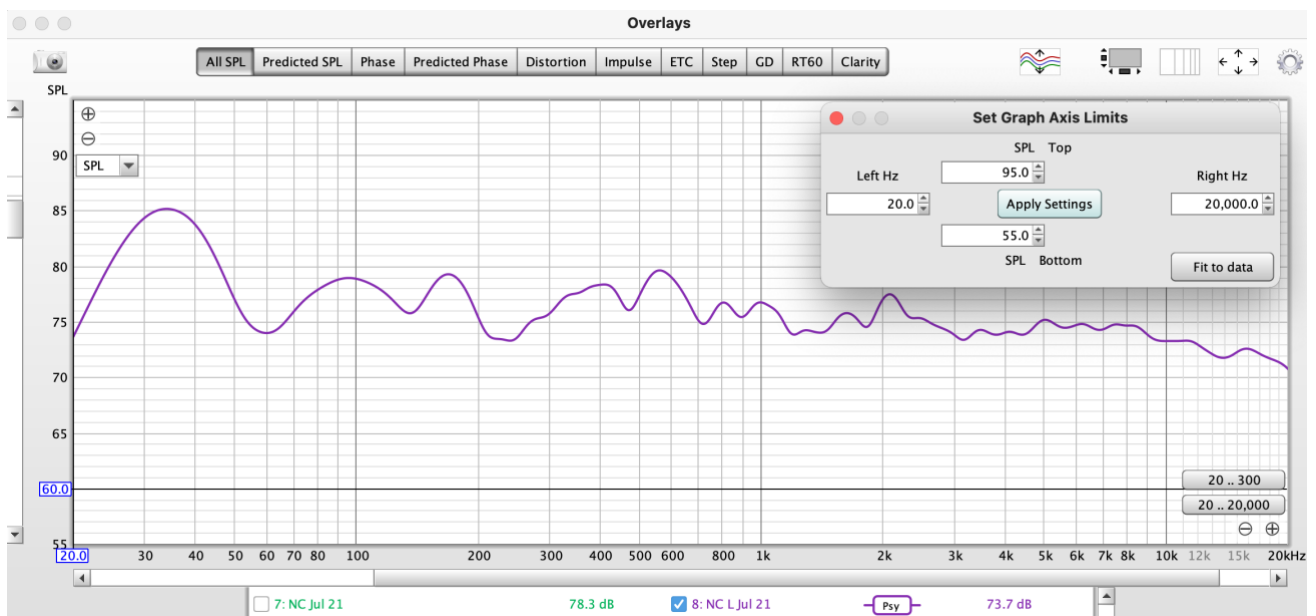
## Réglages proposés pour Amplitude/Fréquence :

Il y a plusieurs possibilités pertinentes pour cet affichage, en faisant varier le lissage, mais aussi en choisissant bien l'échelle de l'amplitude afin d'avoir une vision cohérente des valeurs.

**Une échelle qui me paraît « représentative » et permet des comparaisons faciles, est entre 55dB et 95dB** (pour un niveau moyen mesuré entre 75 et 85dB). Par ailleurs, les lissages les plus utiles sont :

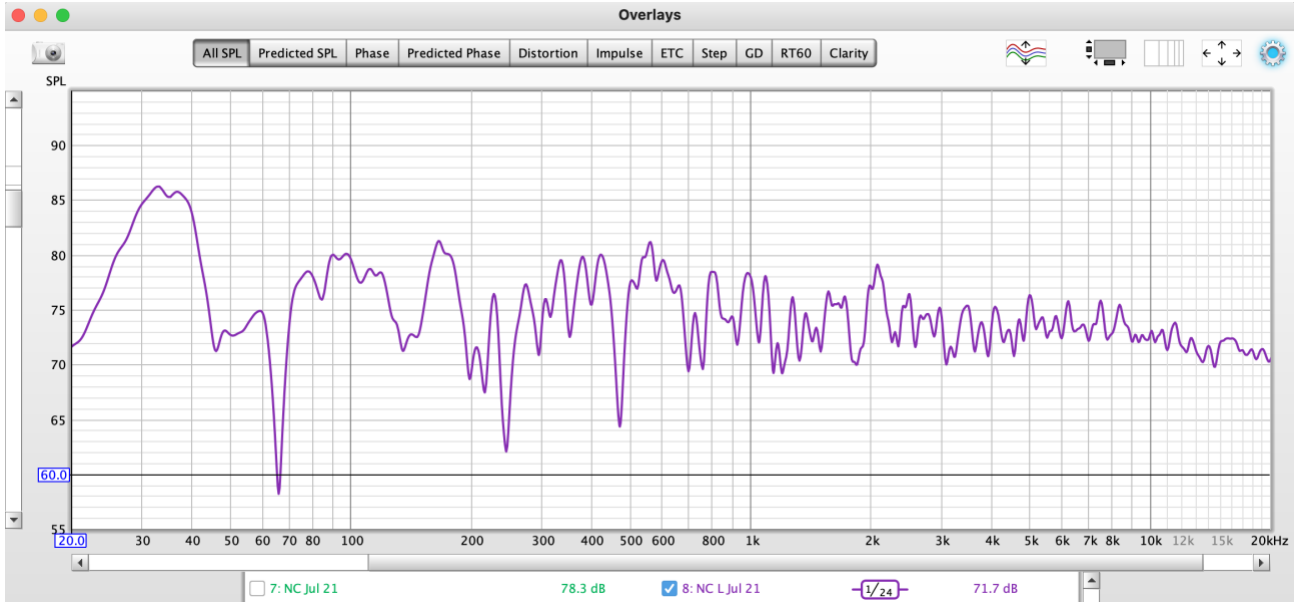
- **1/24 d'octave** pour une meilleure lisibilité des fréquences modales.
- 1/3 d'octave est possible pour une vue « générale », mais je préfère le lissage **Psychoacoustic** qui donne, à mon avis, une vue plus proche de ce que l'on entend. Il est de 1/3 jusqu'à 100Hz, de 1/6 au-dessus de 1000Hz et varie entre 1/3 et 1/6 entre 100 et 1000Hz.
- **Var Smoothing** applique 1/48 jusqu'à 100Hz, varie ensuite de 1/48 à 1/3 jusqu'à 10000Hz, puis 1/3 au-dessus de 10000Hz. Ce lissage est utile lorsqu'on souhaite utiliser l'amplitude pour définir une correction numérique.

Psychoacoustic

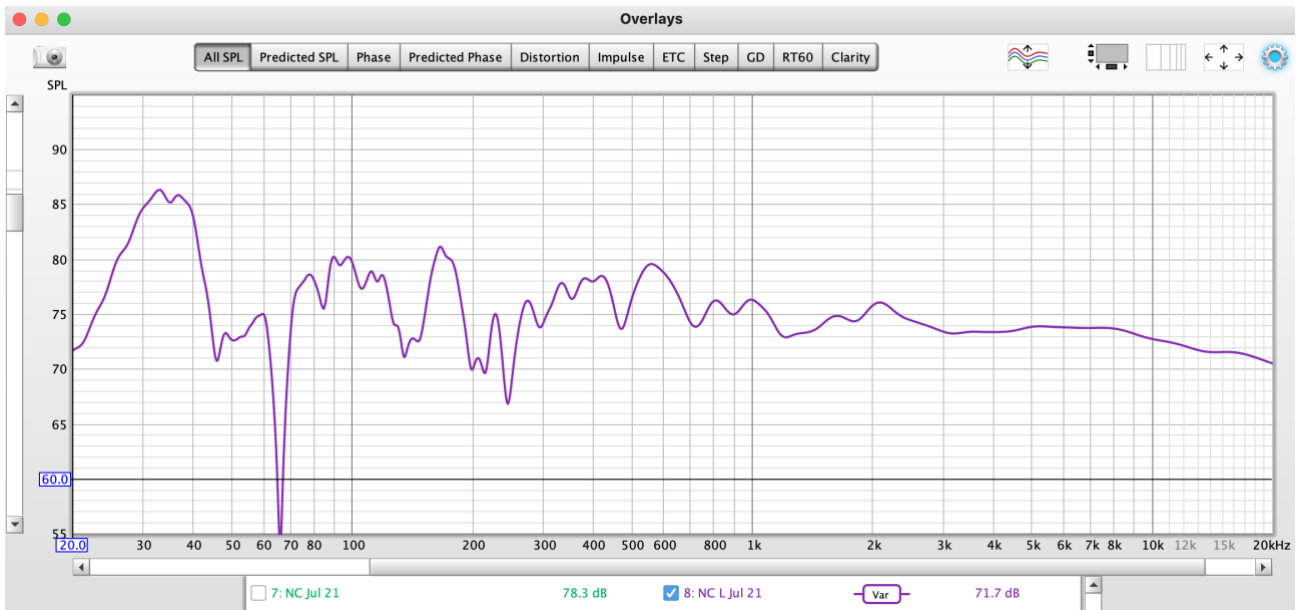




1/24 d'octave



Var Smoothing



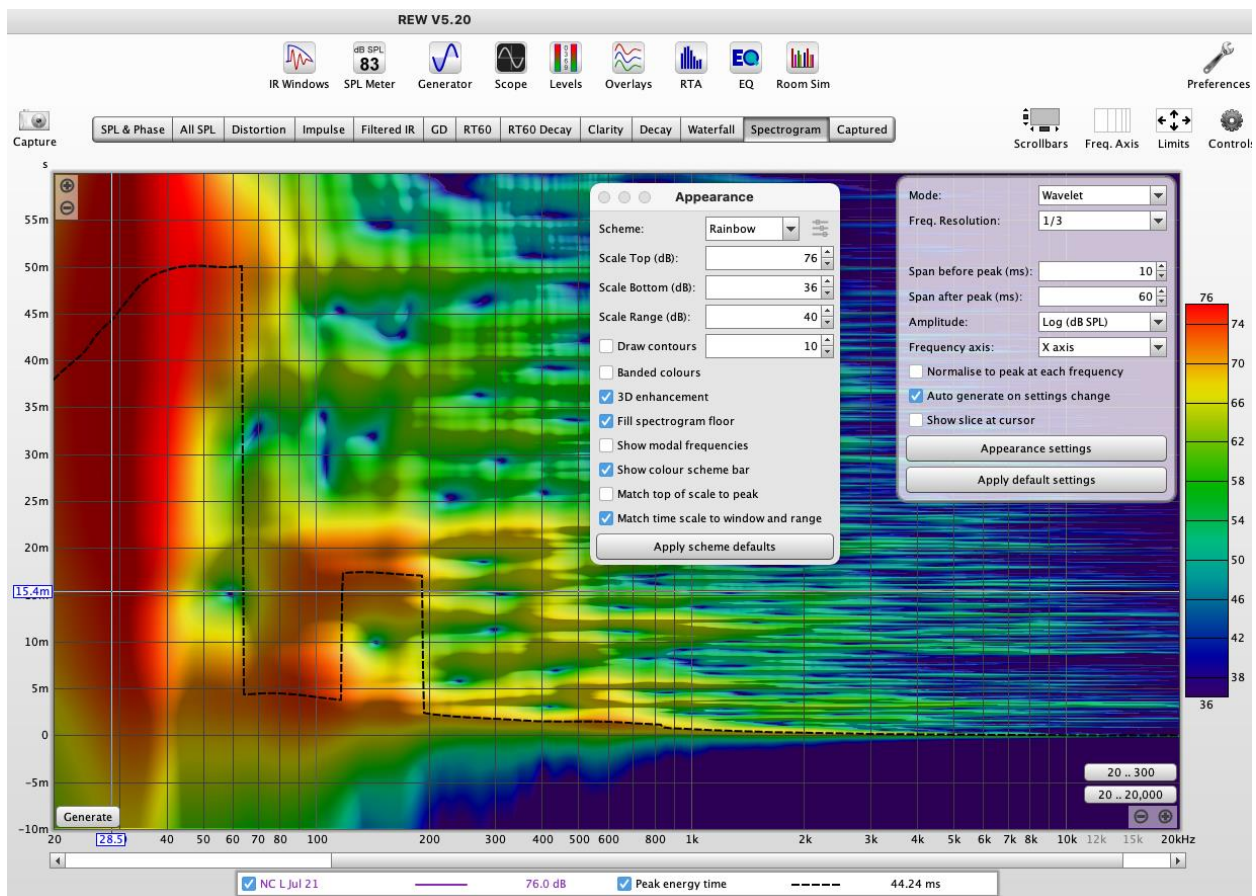


## Réglages Spectrogram (Mode Wavelet) :

Ce spectrogram, complémentaire du Mode Fourier) permet de visualiser les réflexions et, dans une certaine mesure, leur contenu fréquentiel, et les décalages temporels. Son utilité dans le cadre d'un bilan acoustique « amateur » me paraît d'autant plus réduite que son interprétation, pour en tirer des actions concrètes d'amélioration, ne me paraît pas évidente...

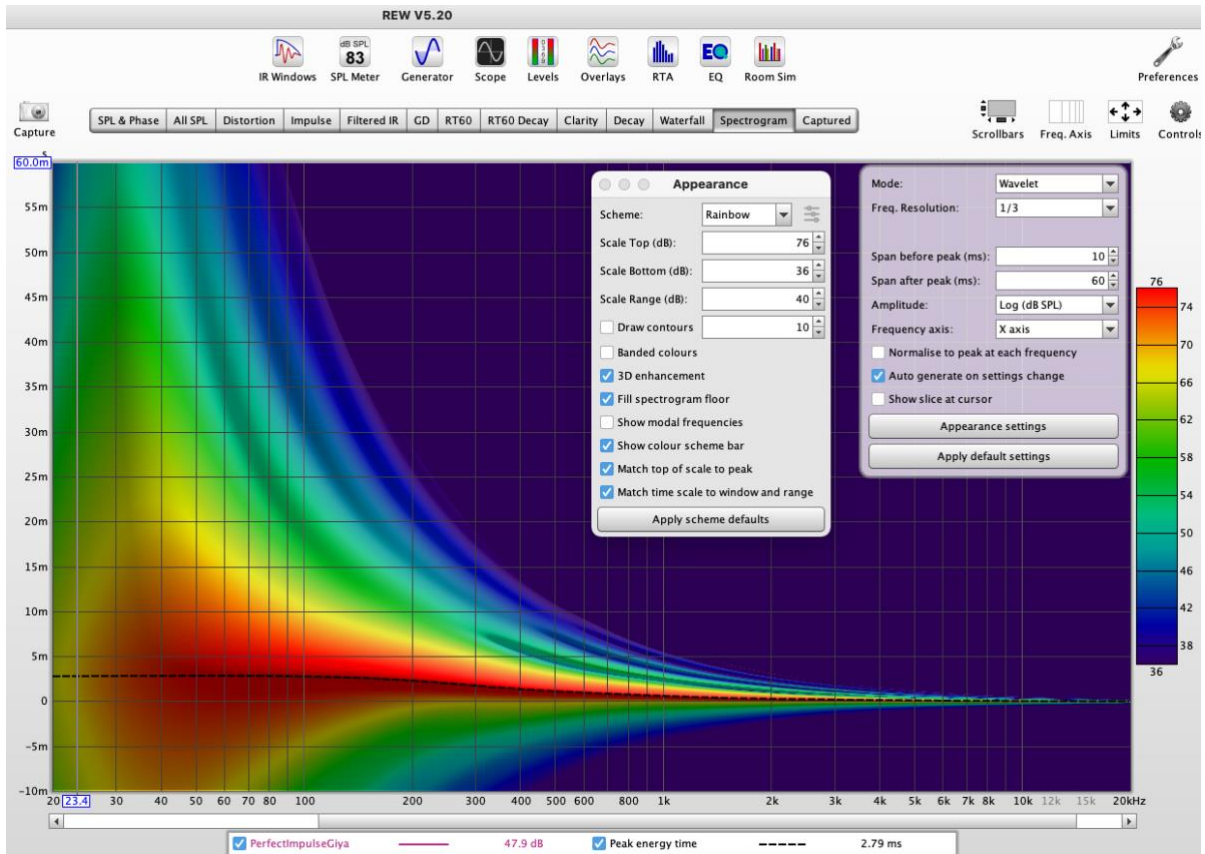
Pour ceux que le sujet intéresse, et qui voudraient comprendre la différence entre les 2 modes de spectrogram proposés par REW, le plus simple est de lire la documentation de REW sur le sujet qu'on trouvera sur le lien suivant : [Spectrograms REW](#)

Les réglages permettant de visualiser les réflexions entre 0ms et 60ms, sont indiqués ci-dessous. Il faut aussi régler le Scale Top (dB) au niveau moyen du sweep enregistré. On peut également choisir « Linear (% peak) » sur le paramètre amplitude (au lieu de log (dB SPL)) qui parfois améliore la lisibilité.





Ci-dessous, pour comparaison, le spectrogram parfait pour des Vivid Audio Giya G3 qu'on obtiendrait dans une chambre anéchoïque, à comparer au spectrogram ci-dessus, qui est le réel mesuré dans mon sous-sol déjà bien traité acoustiquement.





## Annexe 3 : Documents, Liens et Références

### **REW V5.19 Help**

Copyright © 2004-2018 John Mulcahy All Rights Reserved

<https://www.roomeqwizard.com/REWhelp.pdf>

### **Acoustical Measurement Standards for Stereo Listening Rooms**

Nyal Mellor, Acoustic Frontiers LLC & Jeff Hedback, HdAcoustics

[http://www.acousticfrontiers.com/wp-content/uploads/2011/10/acoustic\\_measurement\\_standards.pdf](http://www.acousticfrontiers.com/wp-content/uploads/2011/10/acoustic_measurement_standards.pdf)

### **Listening conditions for the assessment of sound program material: monophonic and two-channel stereophonic**

EBU Tech. 3276 – 2nd edition

<https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>

### **Acoustics and Psychoacoustics Applied - Part 1: Listening room design**

David Howard and Jamie Angus - April 07, 2010

<https://www.edn.com/acoustics-and-psychoacoustics-applied-part-1-listening-room-design/>

### **V. Chollet - Acoustique-2-12**

Université de Franche-Comté

<http://mpeea.free.fr/data/enique/Acoustique-2-12.pdf>

### **L'acoustique du local**

<http://hc.nextgeneration.free.fr/acoustique/acoustique%20du%20local.htm>

### **Lafont Audio – Acoustique et Design**

<http://www.lafontaudio.com/criteres.htm>




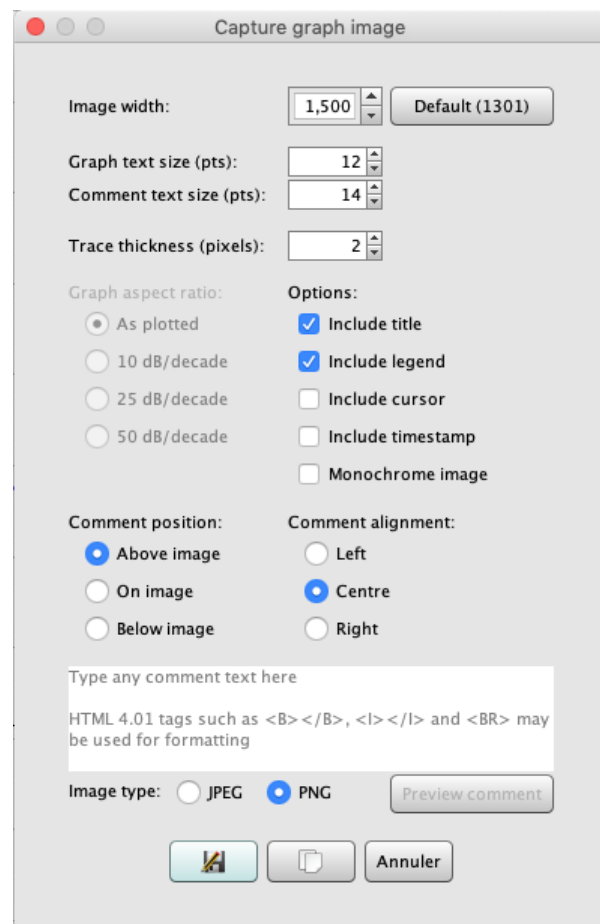
## Annexe 4 : Utilisation des abaques avec REW

Afin de faciliter la création des graphes du « bilan acoustique, j'ai créé un jeu d'abaques au format GIF permettant de superposer les grilles de références sur les graphes issus de REW. Ces abaques sont intégrés dans le PowerPoint d'exemple, disponible en téléchargement sur le forum [AudioMaboules](#), mais on peut aussi utiliser Open Office ou n'importe quel autre logiciel permettant de lire le format PPT.


Les abaques sont, en principe, directement compatibles avec les graphes REW (RT60, Spectro et ETC) lorsque l'on choisit les options suivantes lors de la création de l'image, et les échelles recommandées ci-dessous. Dans ce cas, il suffit d'importer l'image dans Powerpoint (ou autre), puis d'ajuster l'abaque pour le superposer à la même échelle horizontale (il suffit ensuite d'ajuster, si nécessaire, la hauteur de l'échelle verticale et de positionner l'abaque avec les flèches du clavier à l'endroit désiré).

Pour le Decay, comme le GIF est juste une échelle à positionner, il est nécessaire de l'ajuster en longueur et largeur sur le graphe créé.

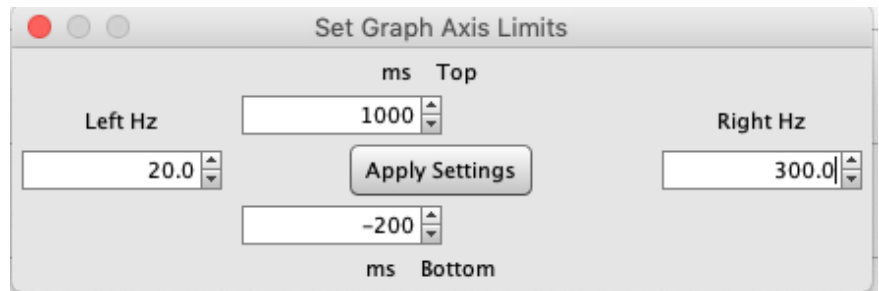
Format d'exportation des images à sélectionner après avoir cliqué sur l'icône  qui se trouve en haut sur la gauche de la plupart des fenêtres de REW.



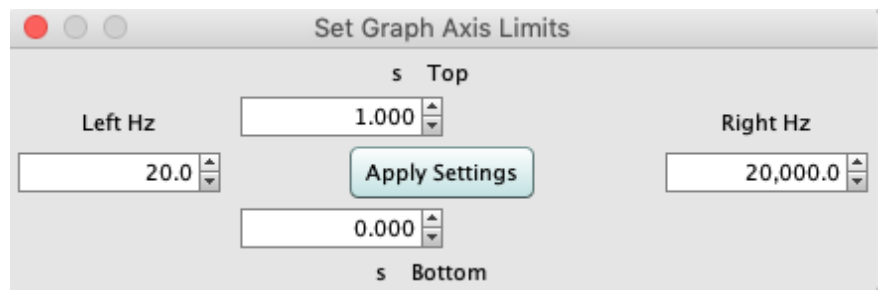


Attention à bien sélectionner les mêmes options d'échelle sinon le format de l'image ne sera pas forcément immédiatement compatible avec les abaques. On accède à ces options en cliquant sur l'icône  qui se trouve en haut sur la droite des fenêtres.

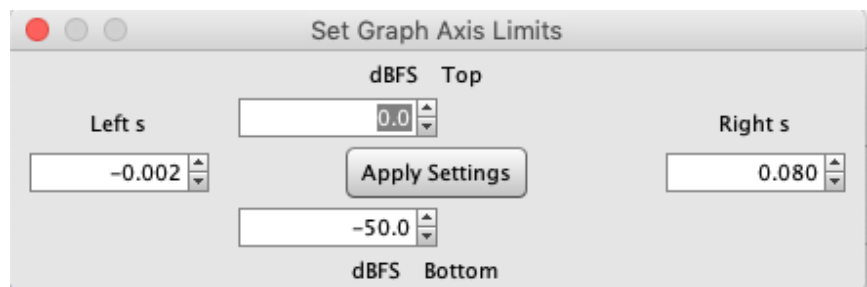
Echelle Spectro :



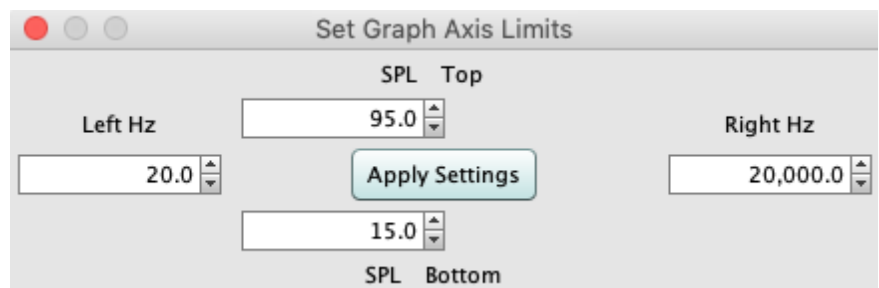
Echelle RT60 :



Echelle ETC :

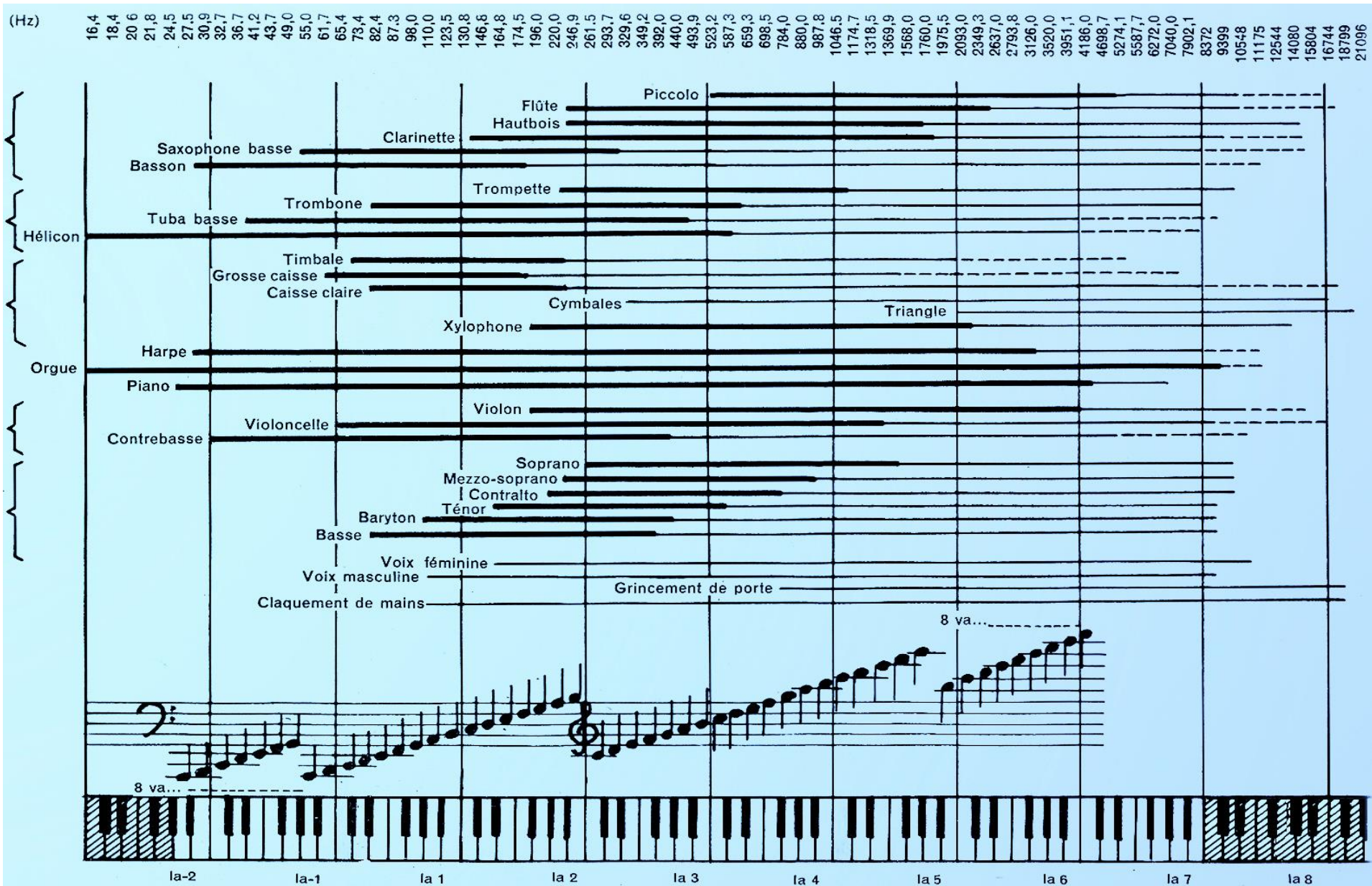


Echelle Decay :





## Annexe 5 : Fréquences des instruments et voix





## Annexe 6 : Exemples de diagnostic

Les premiers exemples sont les évolutions successives d'une pièce « normale » qui a été équipée progressivement en traitements passifs et actifs, et dont on peut voir la progression sur les paramètres acoustiques.

L'exemple suivant est une pièce normale (salon) non traitée, qui représente ce qui se produit généralement dans une pièce non traitée.

Ce dernier exemple est également donné en format PPT, qu'on pourra utiliser pour importer ses propres mesures sur les abaques.

# Historique Evolution Sous-sol filidan-pda0

	août-21	juil-19	juil-17	déc-16	avr-16
<b>Dimensions pièce d'écoute</b>					
Longueur (m)	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82
Largeur (m)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Hauteur (m)	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37
Volume (m3)	46	46	46	46	46
<b>Enceintes</b>					
Marque	<b>Vivid Audio</b>	<b>Vivid Audio</b>	<b>Vivid Audio</b>	<b>Vivid Audio</b>	<b>Vivid Audio</b>
Modèle	<b>Giya G3</b>	<b>Giya G3</b>	<b>Giya G3</b>	<b>Giya G3</b>	<b>Giya G3</b>
Dispersion Horizontale (degrés)	110	110	110	110	110
Dispersion verticale (degrés)	80	80	80	80	80
<b>Traitement passif</b>					
	Basstraps à membranes <b>optimisés</b> , GIK, Vicoustic, absorption & diffusion	Basstraps à membranes, GIK, Vicoustic, absorption & diffusion	Recomm. GIK acoustics + diffusion Vicoustic	Recomm. GIK acoustics	Non
<b>Correction Numérique</b>					
	<b>Non</b>	<b>RePhase</b>	<b>Dirac Live</b>	<b>Non</b>	<b>Non</b>
<b>RT60</b>					
Idéal = Tm (s)	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231
moyen mesuré (s)	0,224	0,250	0,300	0,300	0,550
<b>Fréquence Schroeder</b>					
pour Tm (Hz)	142	142	142	142	142
pour RT60 mesuré (Hz)	140	148	162	162	219
<b>Distance Critique</b>					
pour Tm (m)	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44
pour RT60 mesuré (m)	2,47	2,29	1,99	1,34	1,34

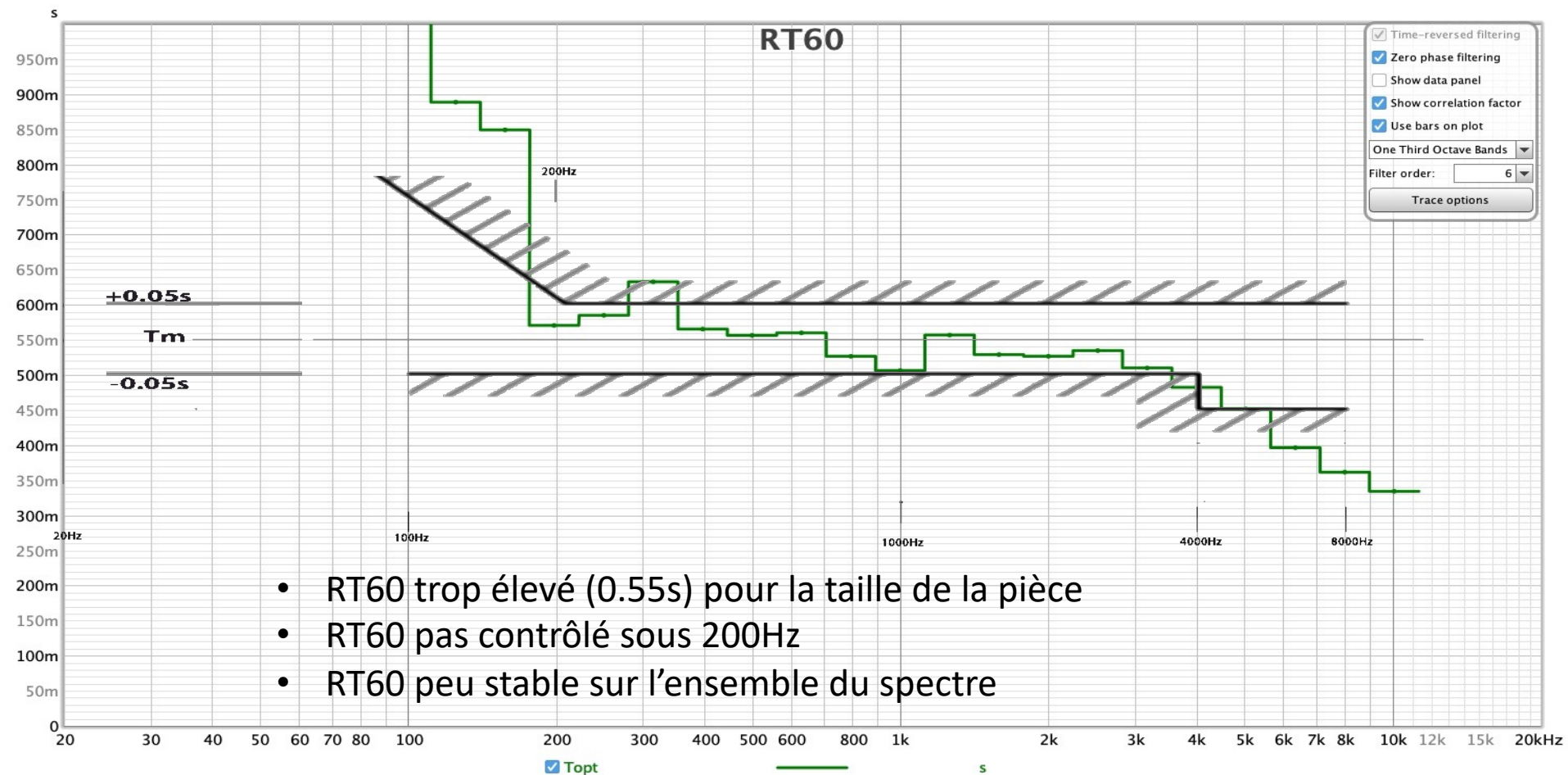


# Avril 2016

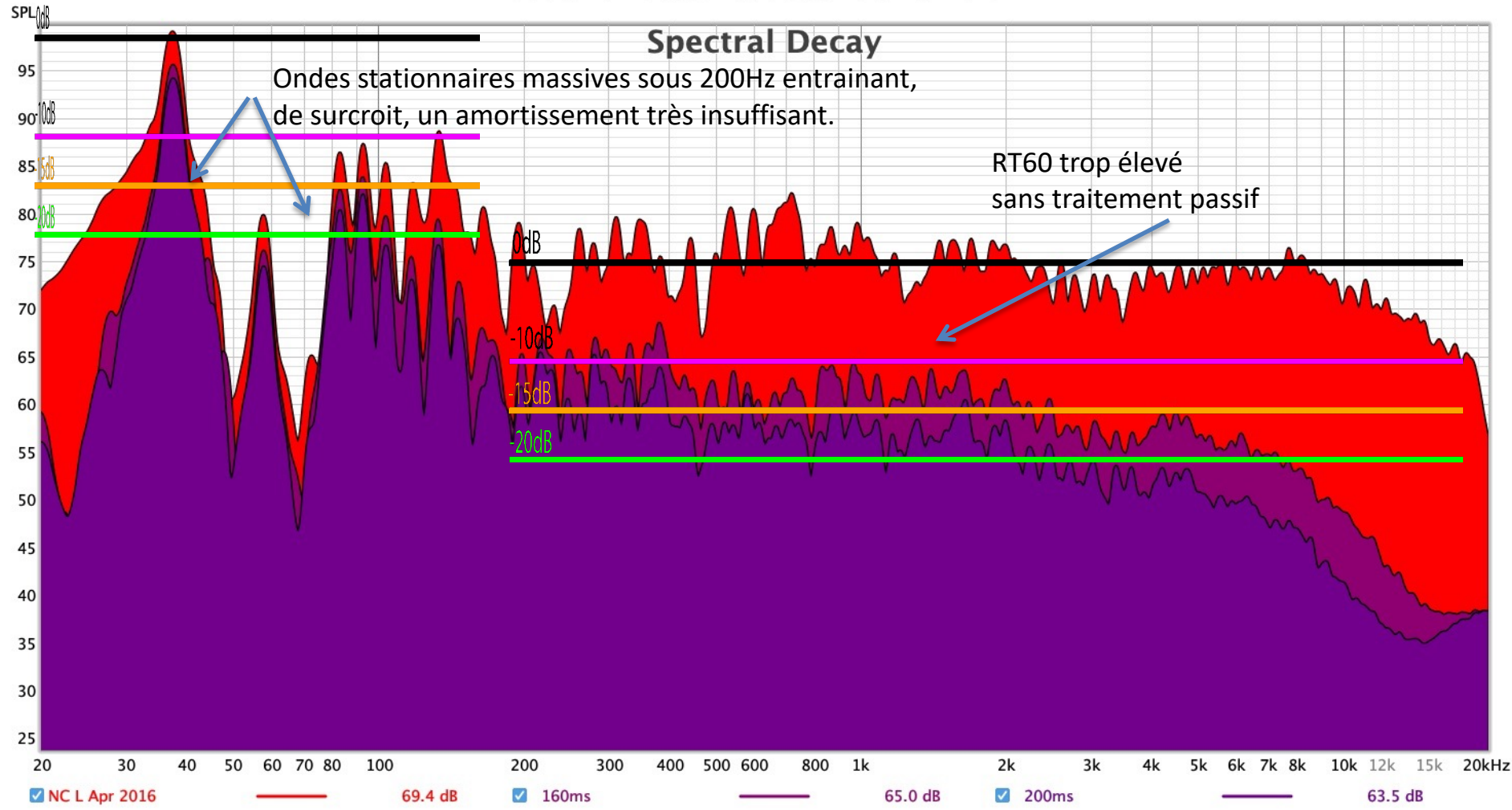
Aucun traitement passif  
Aucune correction numérique



## Sous-sol pda0 – sans aucun traitement passif – Avril 2016



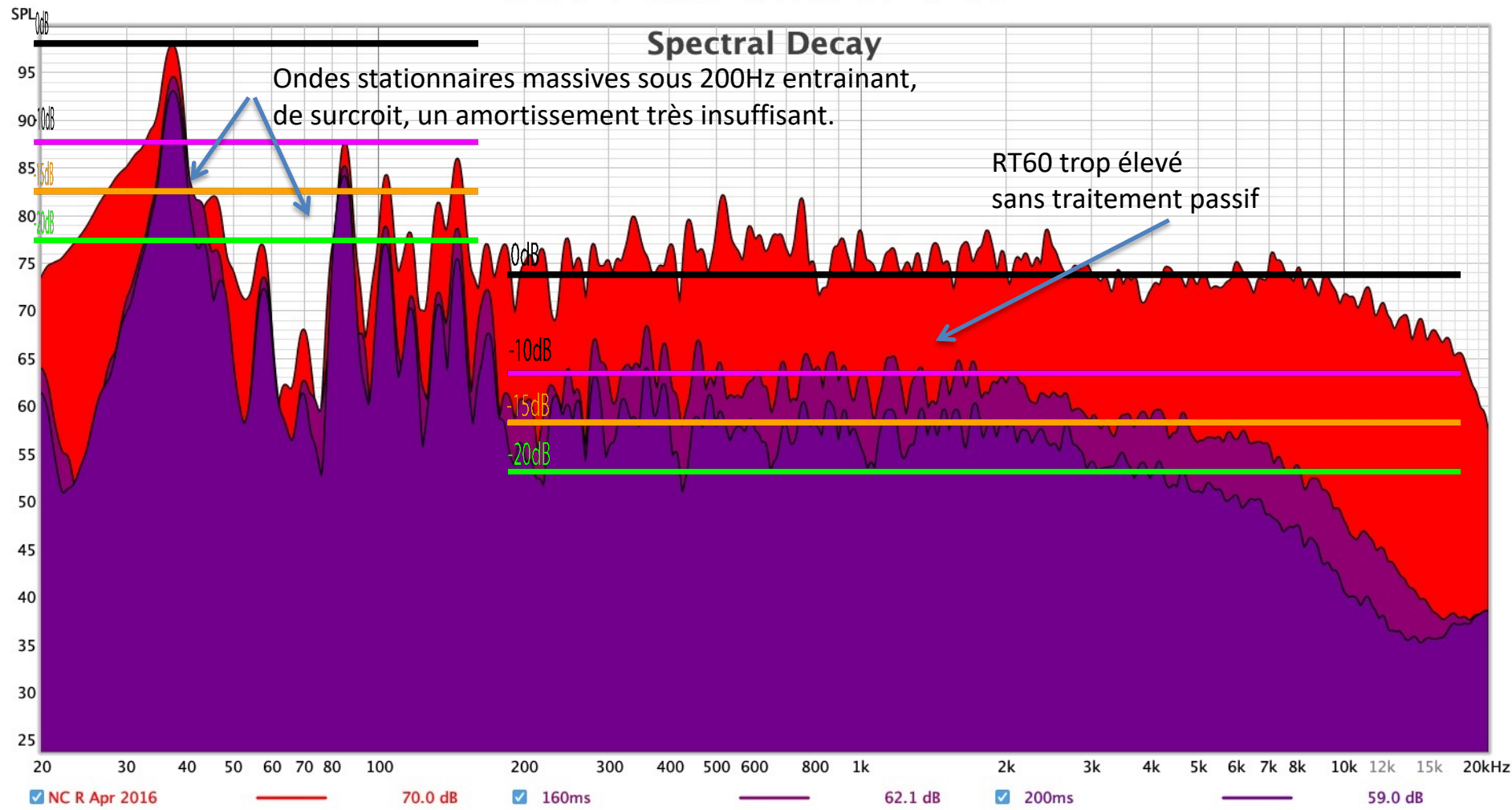
Left channel - Giya G3 - sans traitement - Apr 2016



- Les problèmes dans cette pièce sont nombreux, et il n'est pas étonnant que le résultat à l'écoute ait été décevant...
- Le RT60 est trop élevé entraînant un amortissement insuffisant et une perte de dynamique.



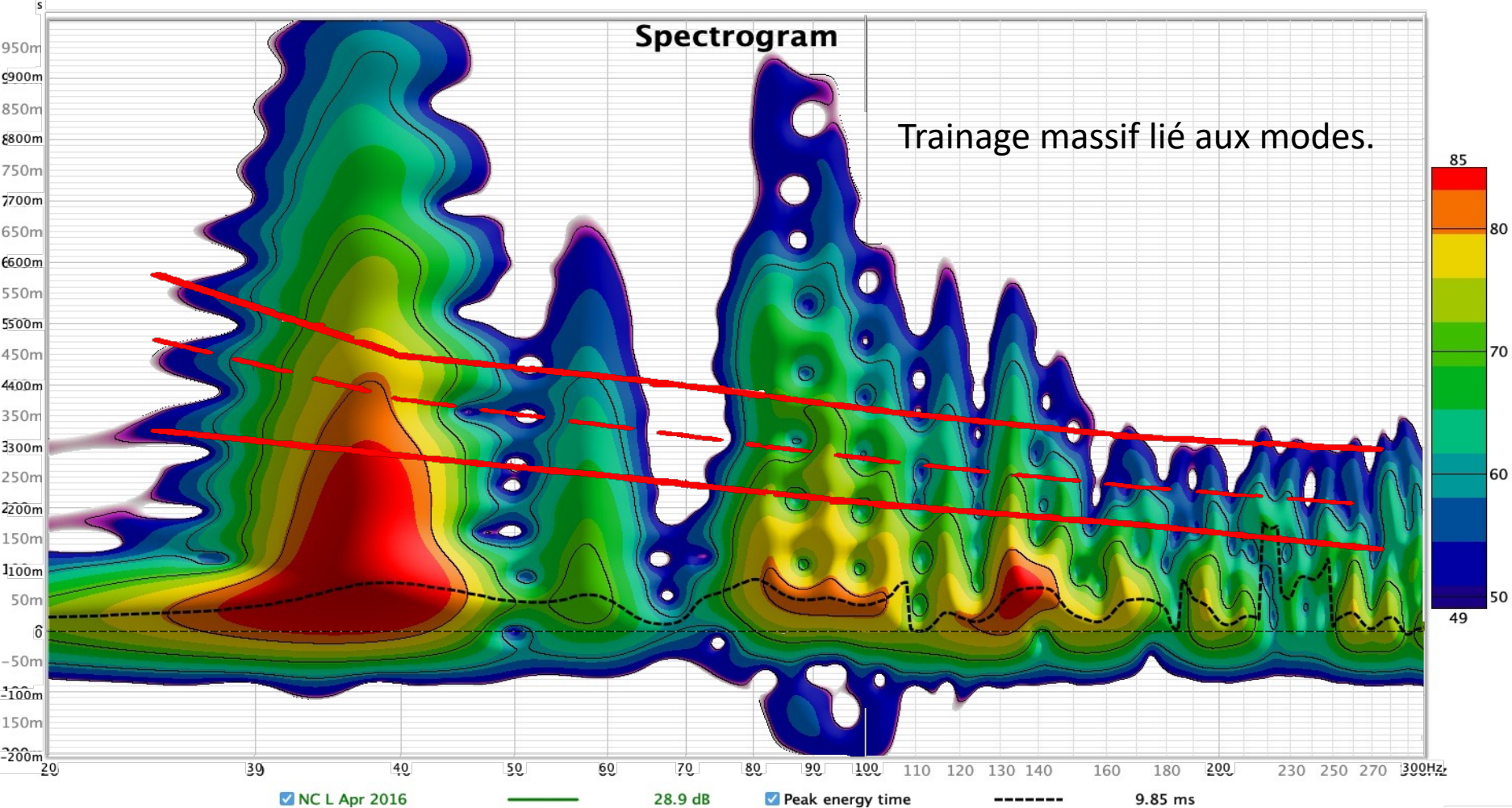
Right channel – Giya G3 – sans traitement – Apr 2016



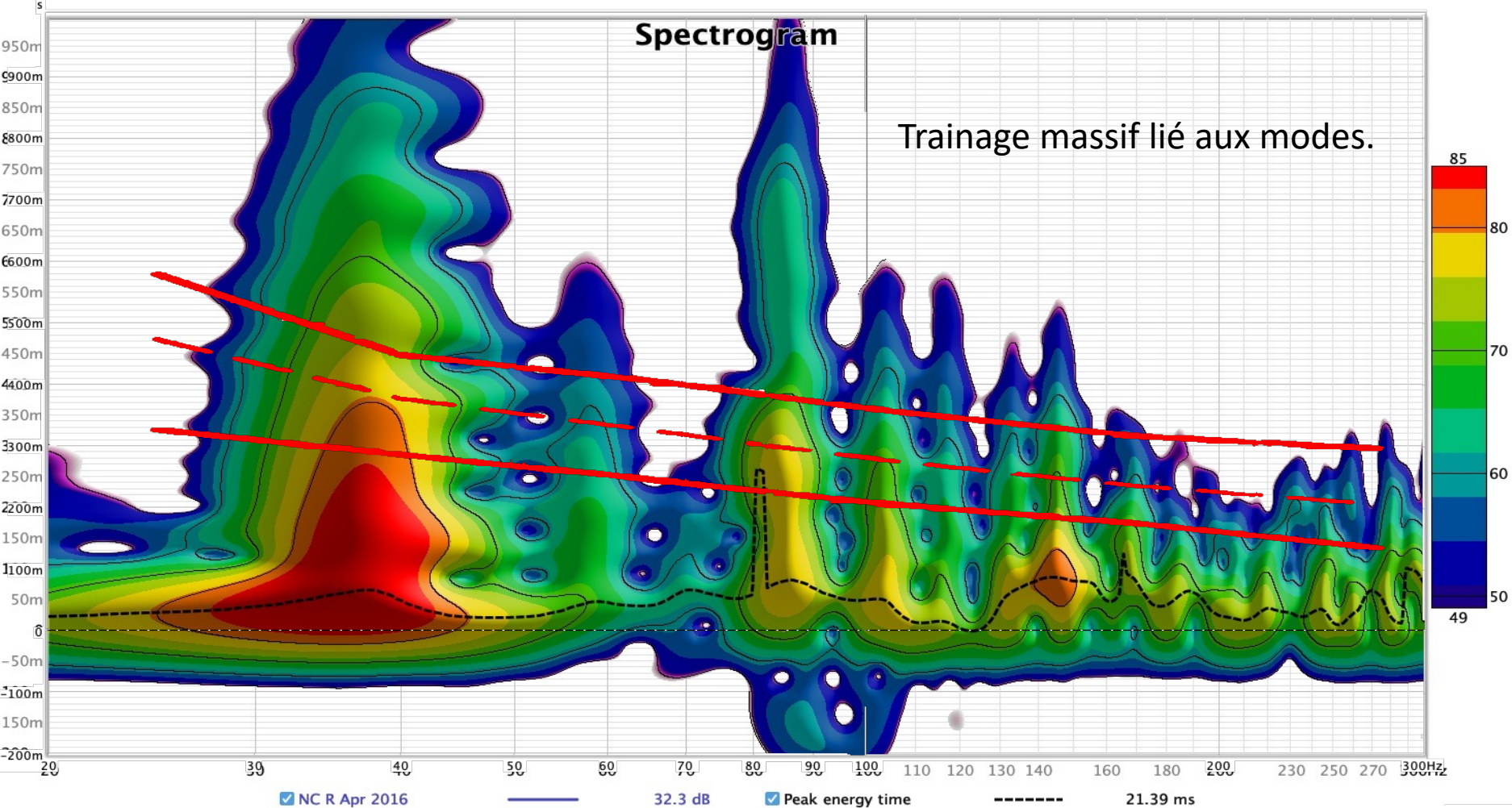
- Même constat à droite.



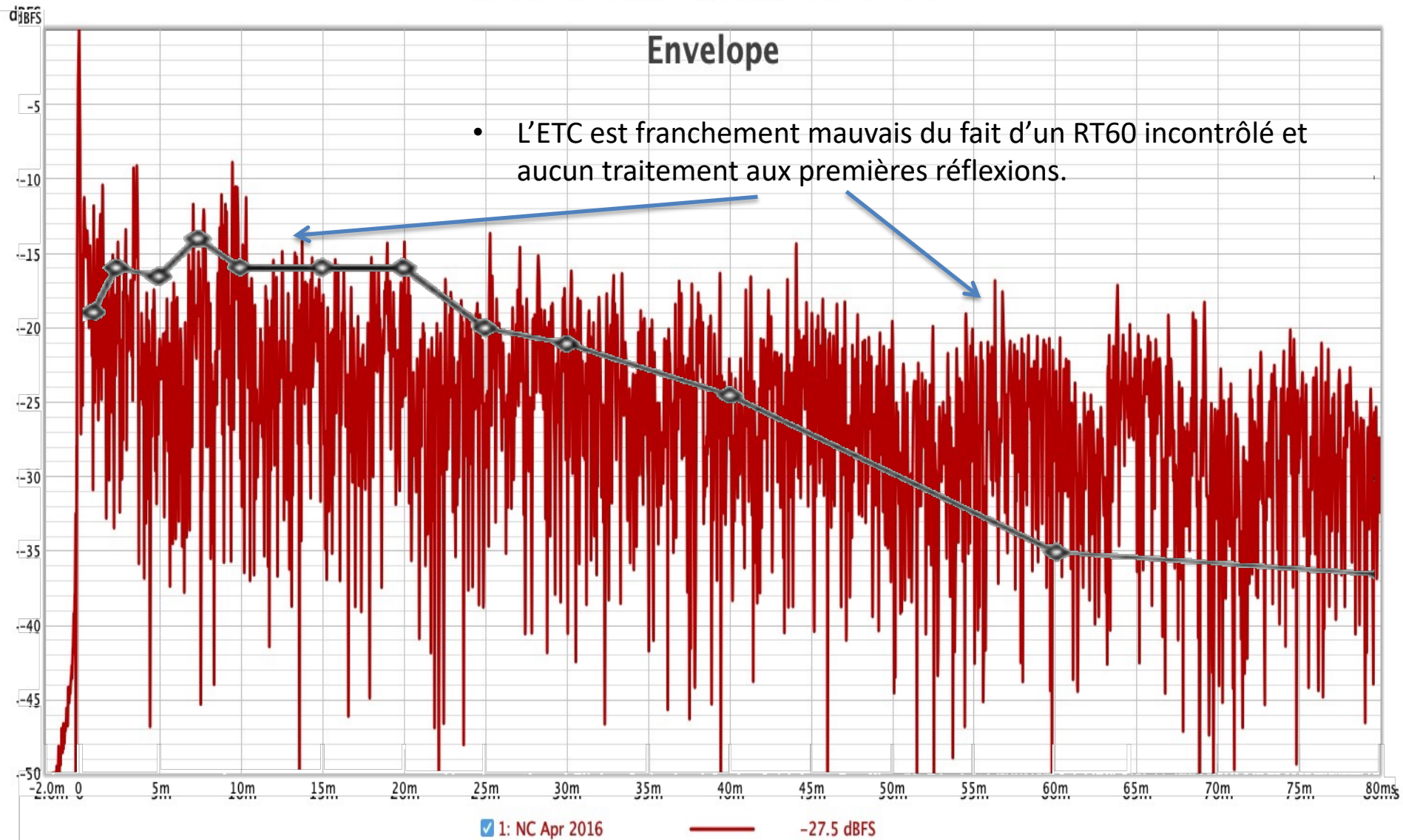
Left channel - Giya G3 - sans traitement - Apr 2016



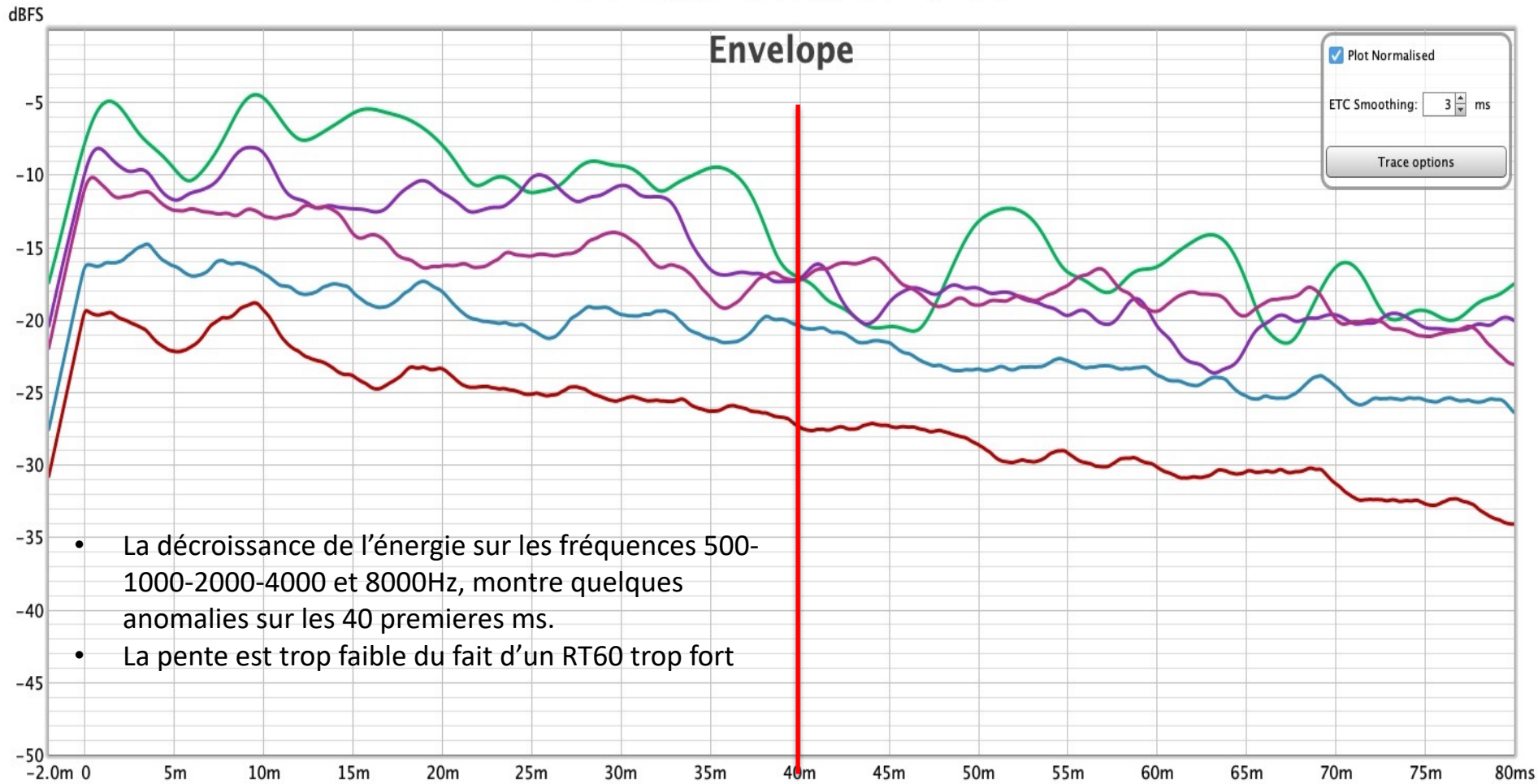
Right channel – Giya G3 – sans traitement – Apr 2016



Both channels - Giya G3 - sans traitement - Apr 2016

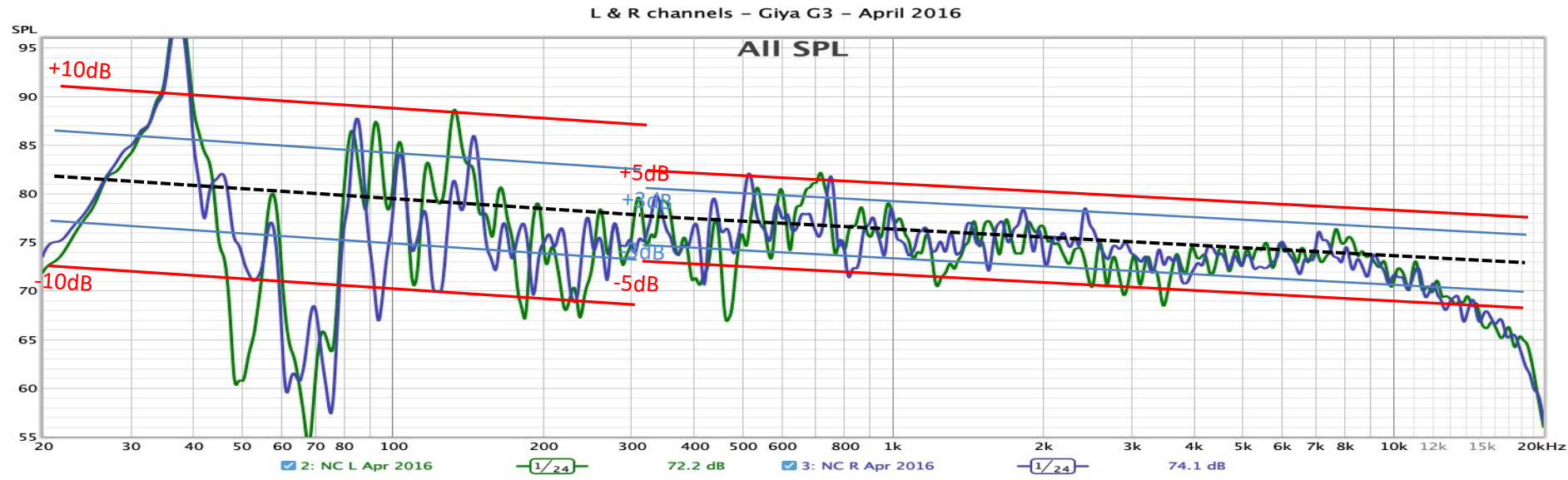
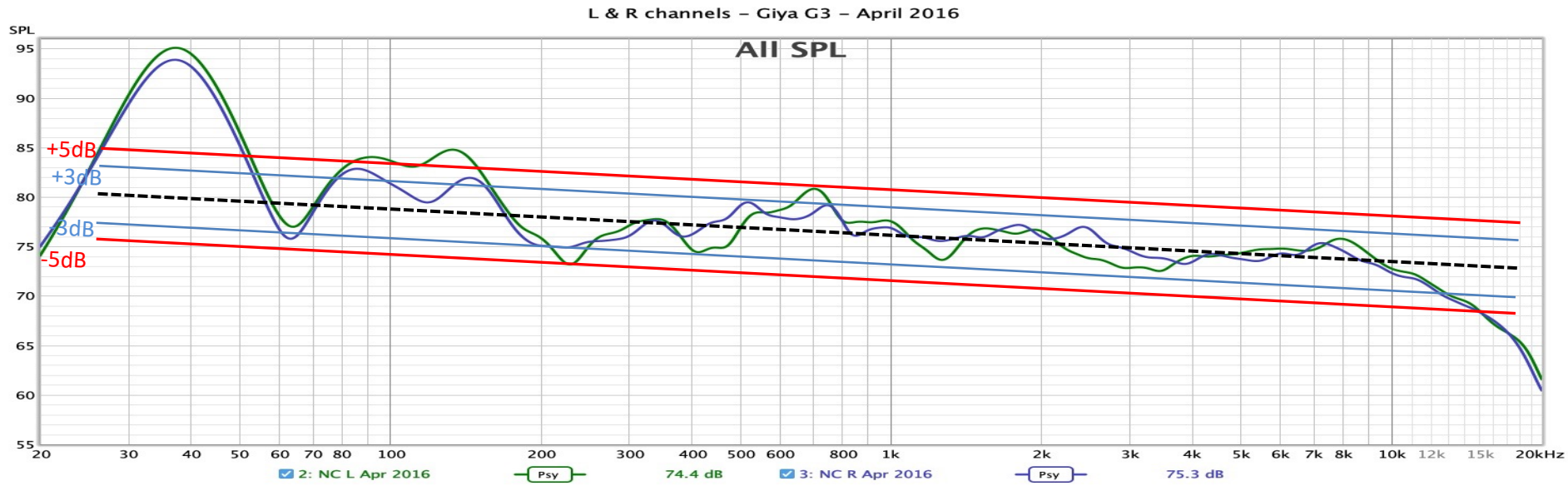


ETC 40ms - Giya G3 - sans traitement - Apr 2016



<input checked="" type="checkbox"/> 7: NC Apr 2...[500 Hz 1/1] ———	-17.5 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 8: NC Apr ...[1000 Hz 1/1] ———	-20.1 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 9: NC Apr ...[2000 Hz 1/1] ———	-23.1 dBFS
<input checked="" type="checkbox"/> 10: NC Apr ...[4000 Hz 1/1] ———	-26.4 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 11: NC Apr ...[8000 Hz 1/1] ———	-34.1 dBFS		





Ces mesures d'amplitude/fréquence sont correctes en dehors de la zone modale qui montre la présence de résonances massives. La cohérence droite/gauche reste bonne malgré les difficultés inhérentes à la pièce.



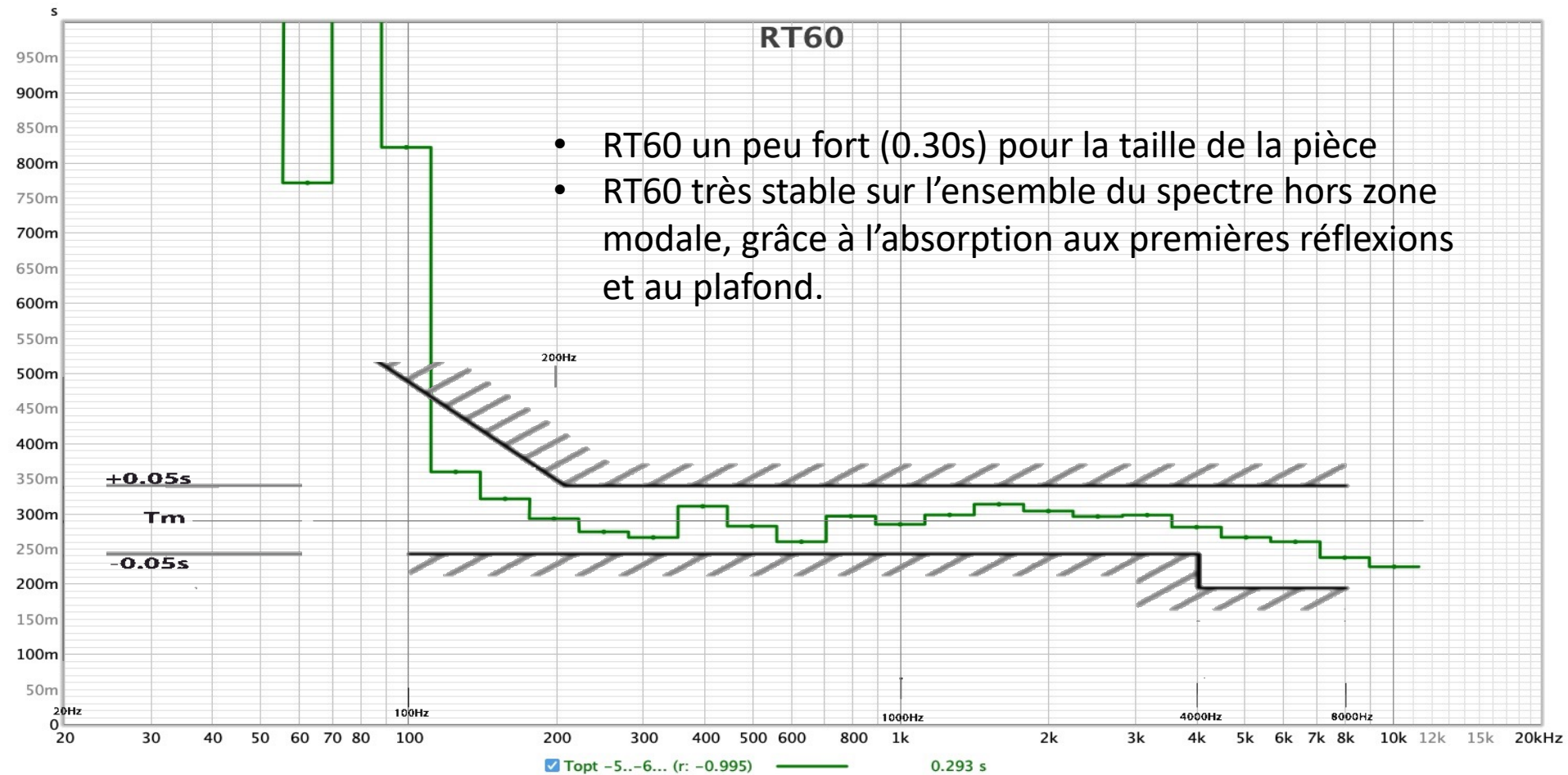
# Décembre 2016

Traitement passif recommandé par  
GIK acoustics

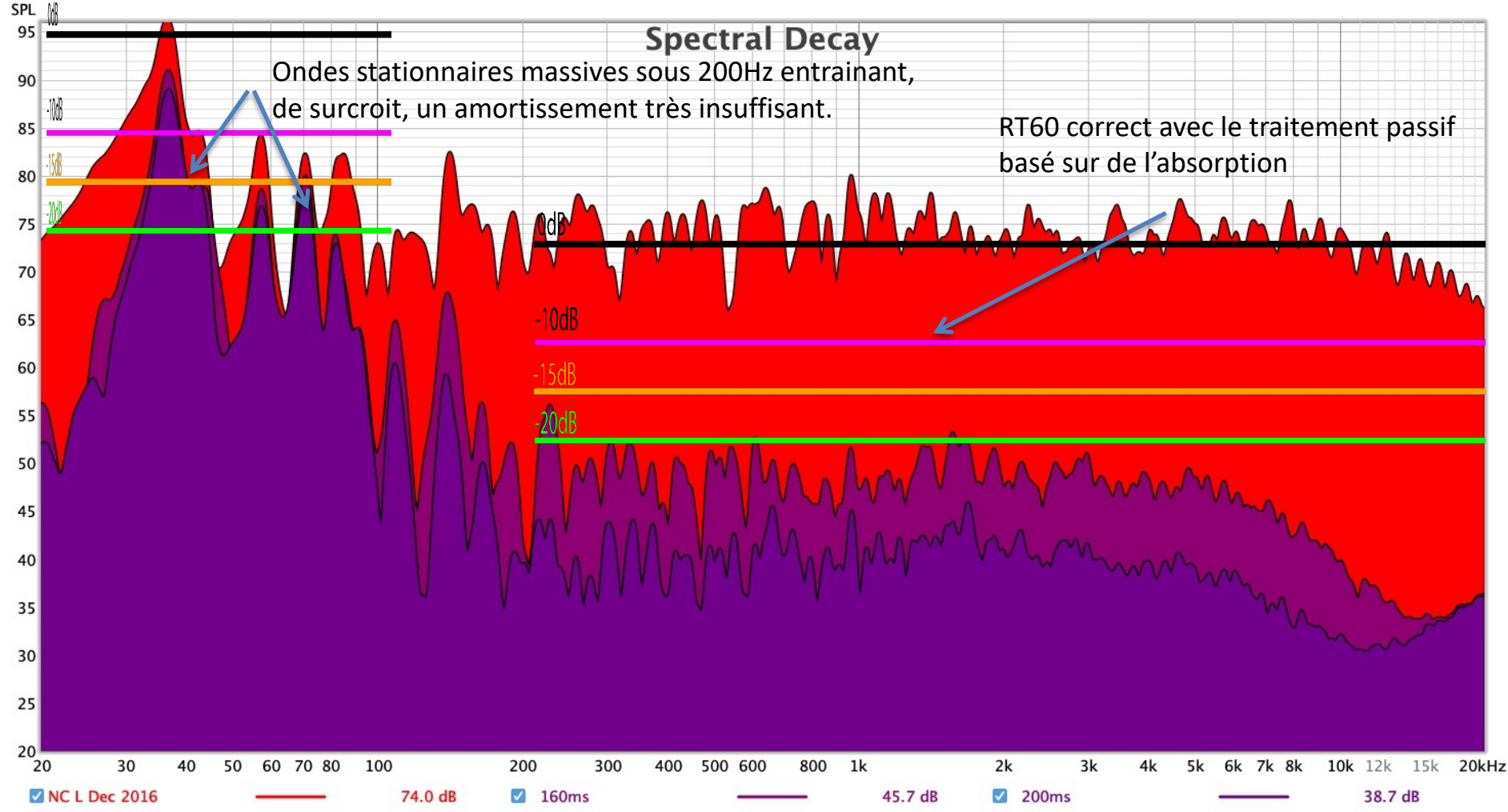
Aucune correction numérique



## Sous-sol pda0 – après traitement passif en décembre 2016



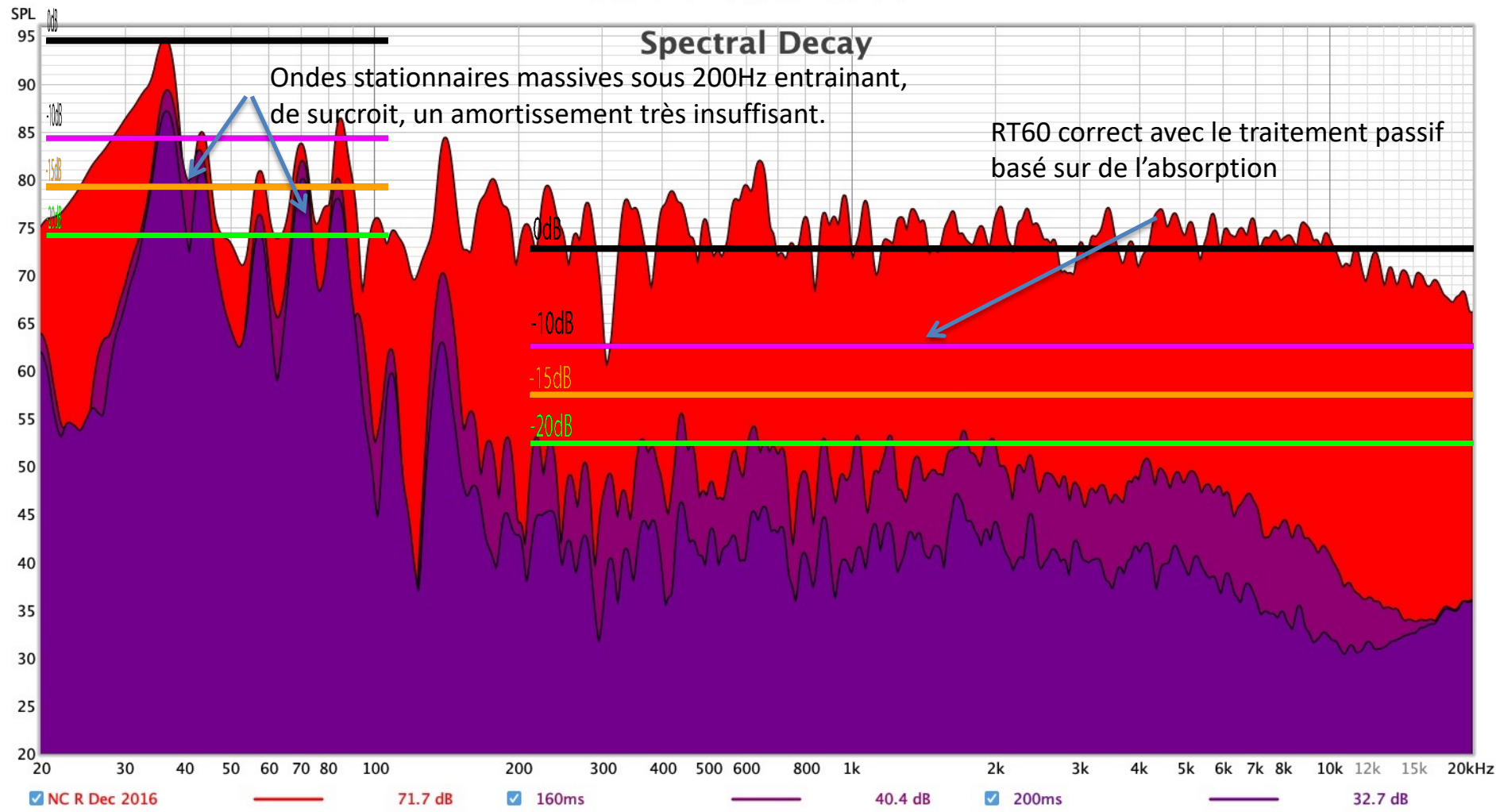
Left channel – Giya G3 – dec 2016



- Les problèmes dans la zone modale de cette pièce restent présents, malgré une amélioration dans la zone 80-200Hz grâce aux traitements passifs GIK...
- Le RT60 est correct dans la zone réverbérée.



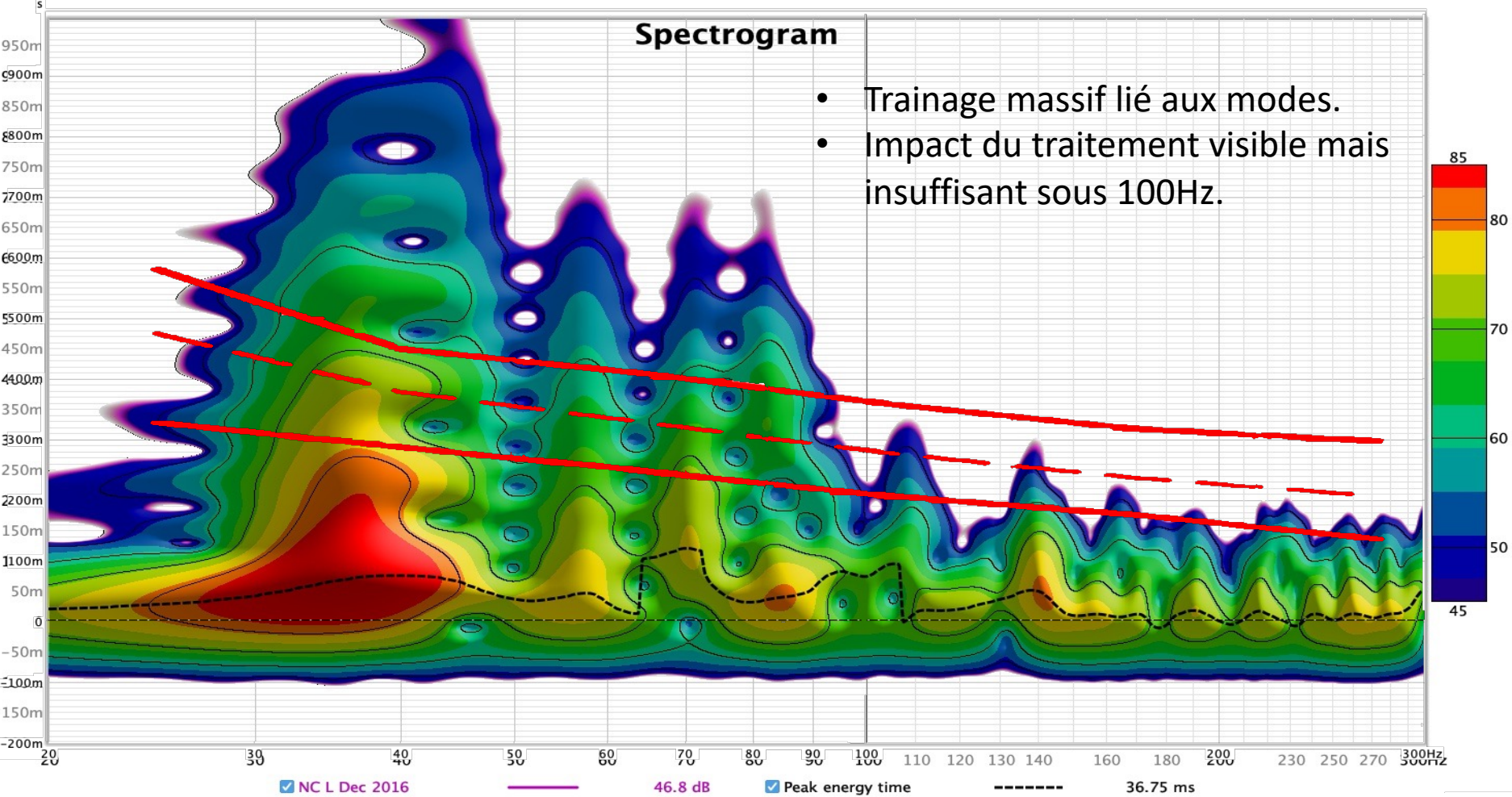
Right channel – Giya G3 – dec 2016



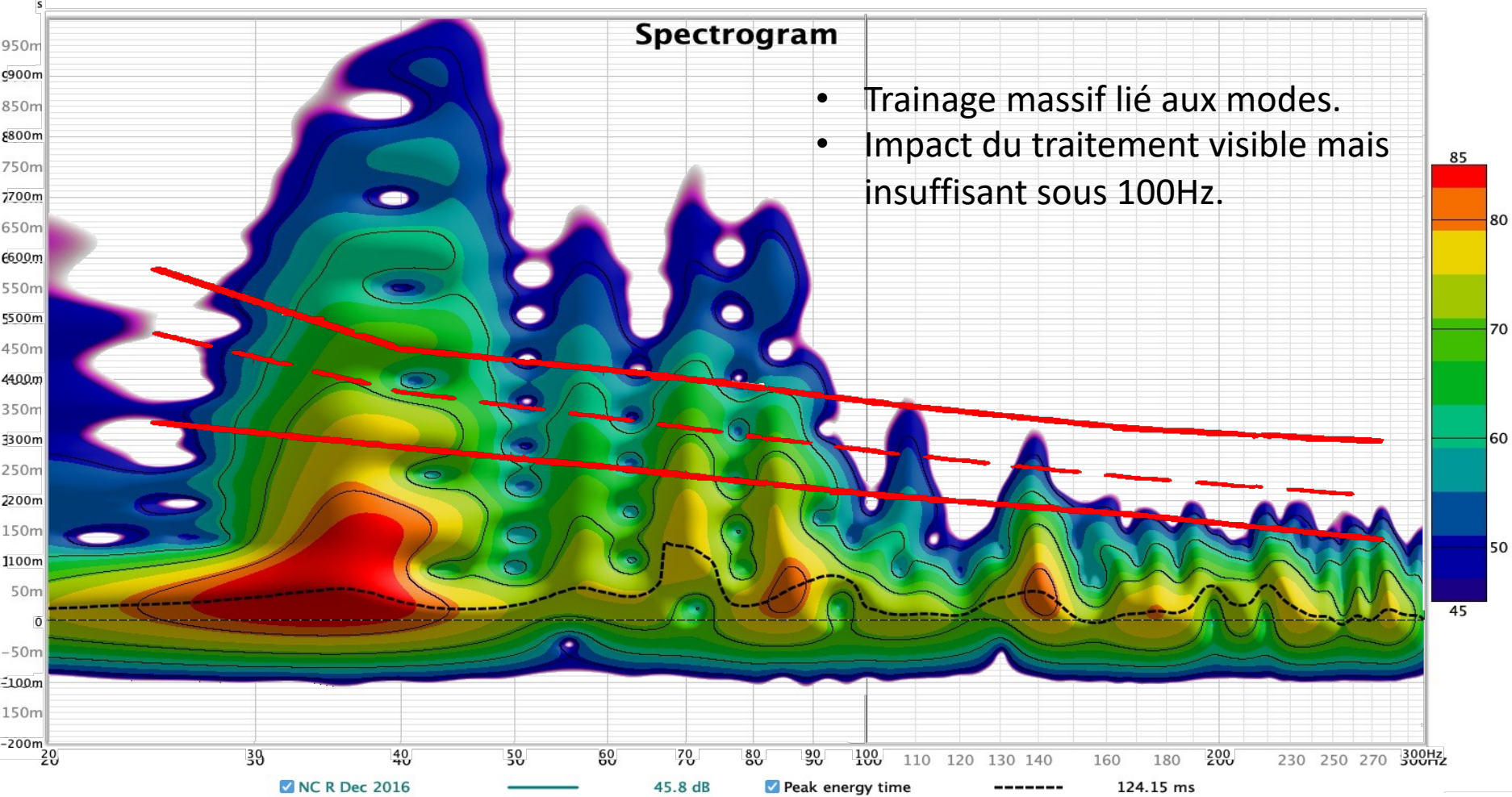
- Même constat à droite.



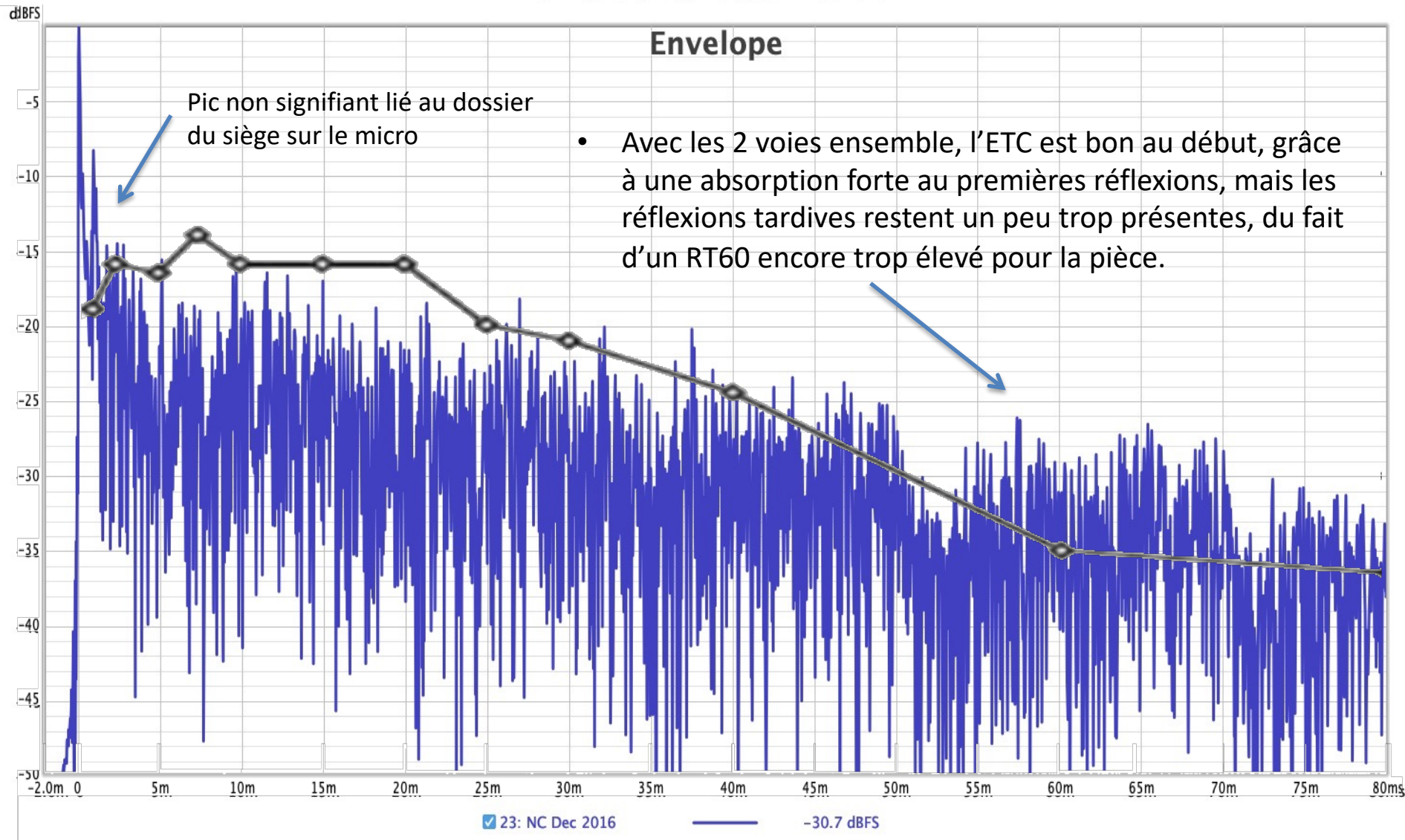
Left Channel – Giya G3 – dec 2016



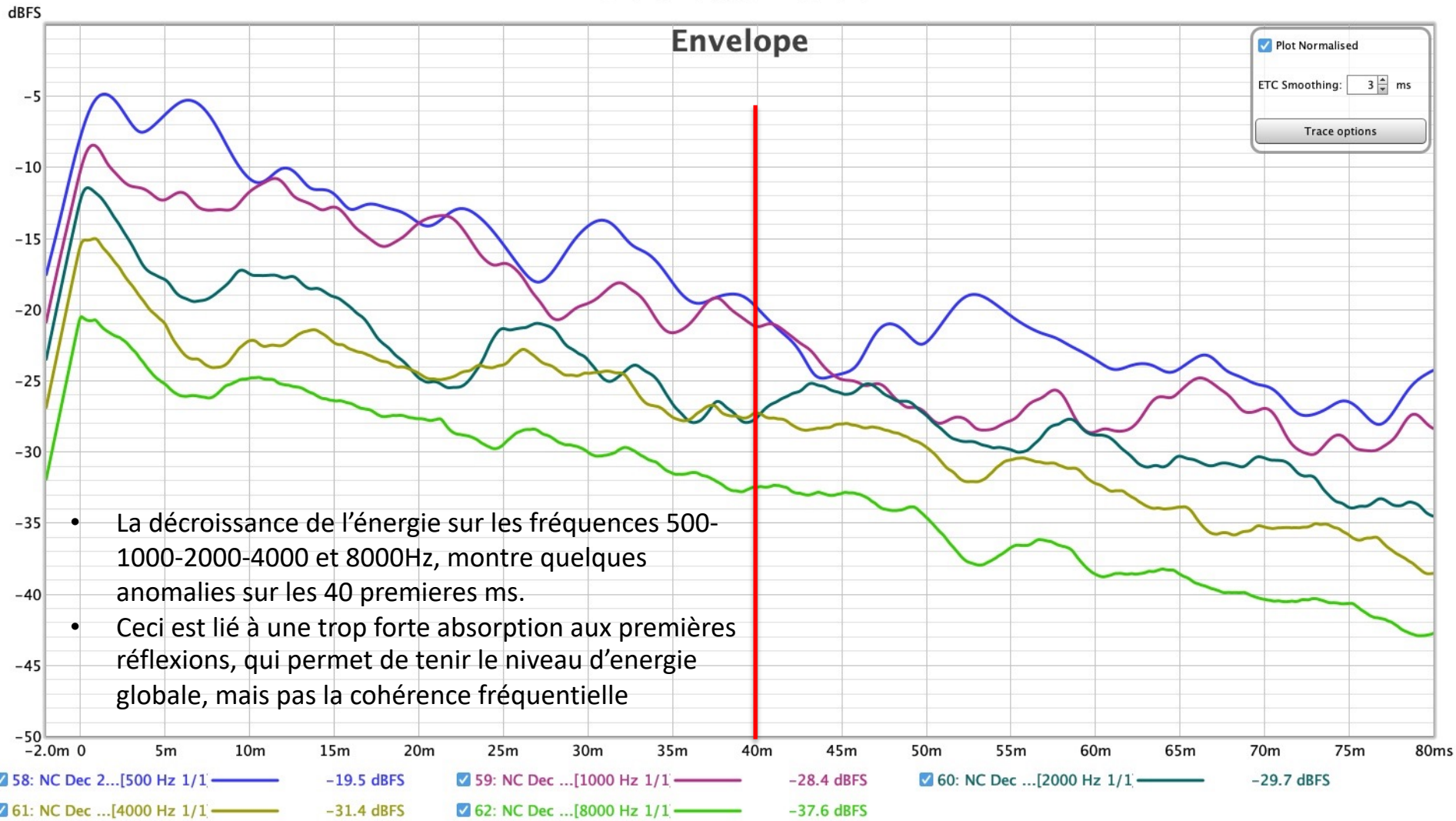
Right channel - Giya G3 - dec 2016

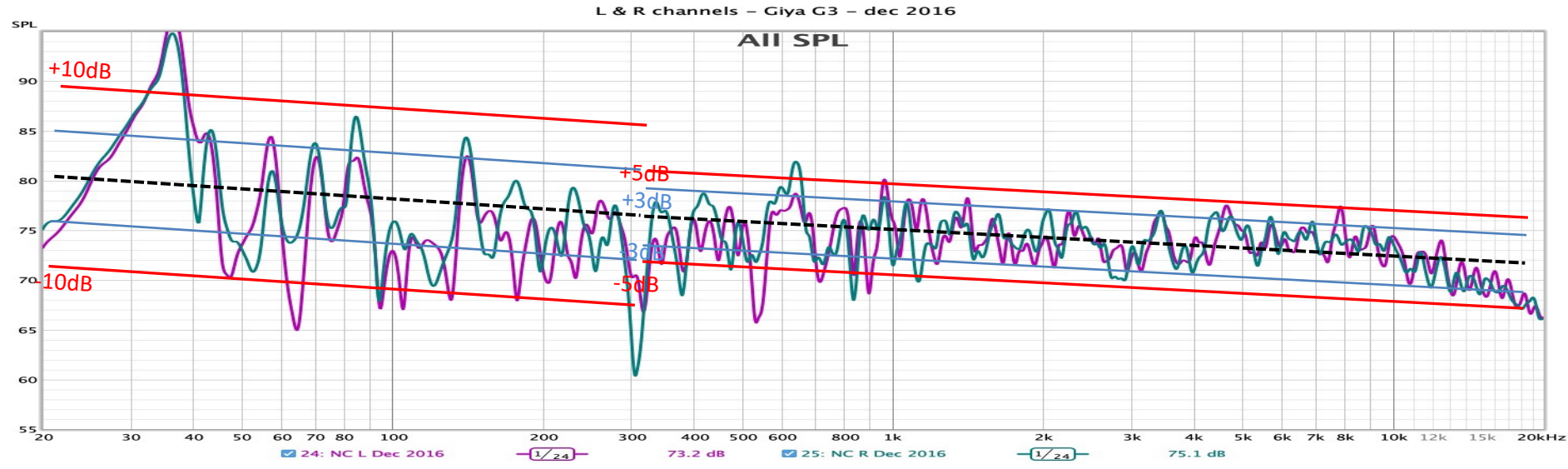
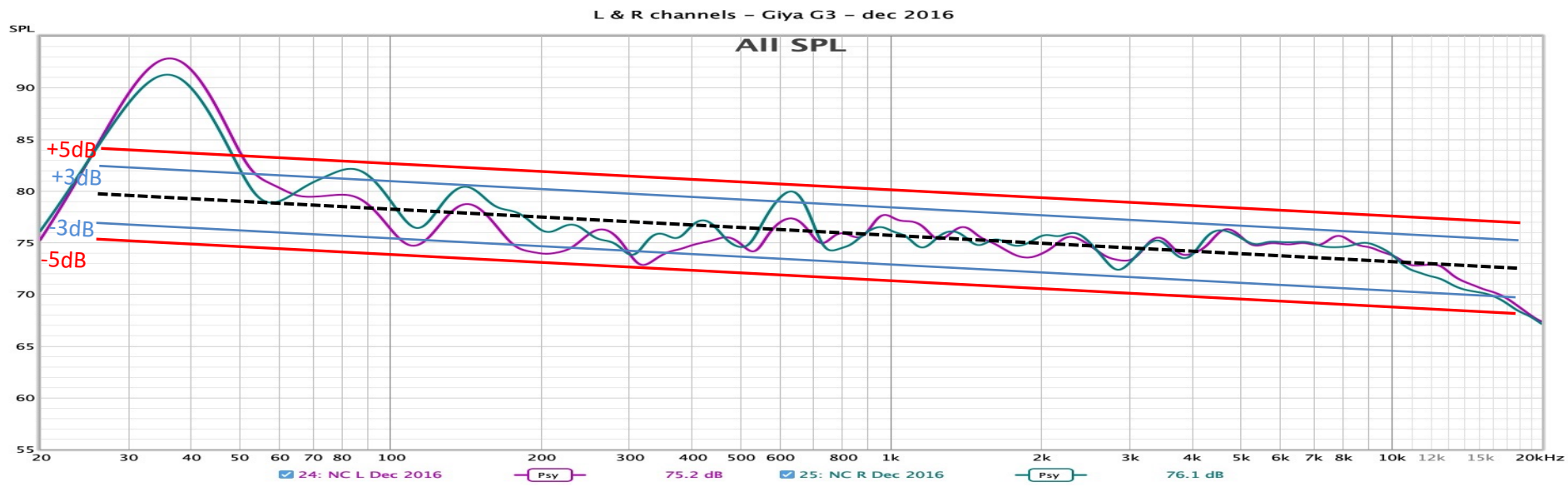


ETC – Both channels – Giya G3 – Dec 2016



ETC 40ms – Giya G3 – Dec 2016





Ces mesures d'amplitude/fréquence sont correctes mis à part la zone modale qui présente toujours des résonances massives. La cohérence droite/gauche reste très bonne malgré les difficultés inhérentes à la pièce.

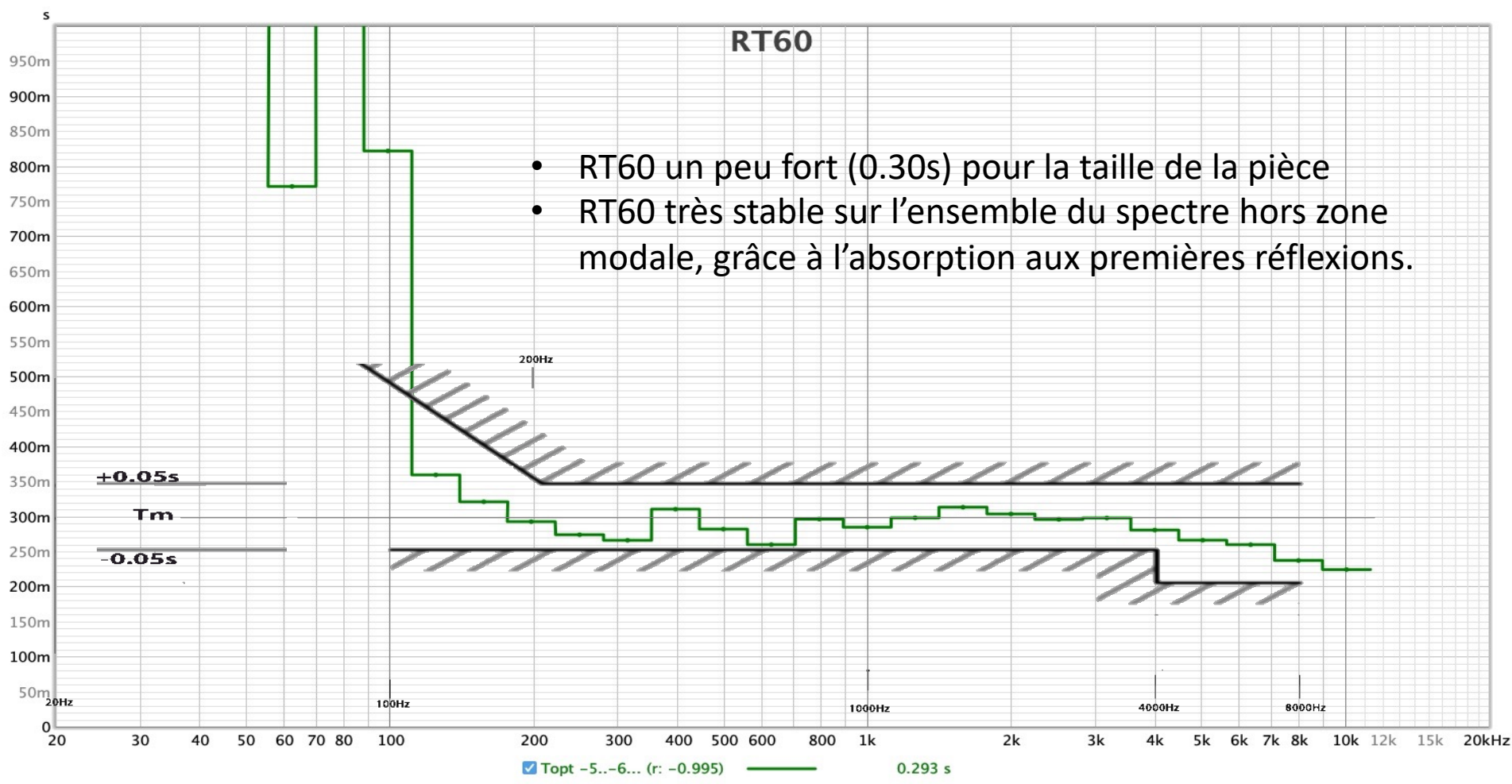


# Juillet 2017

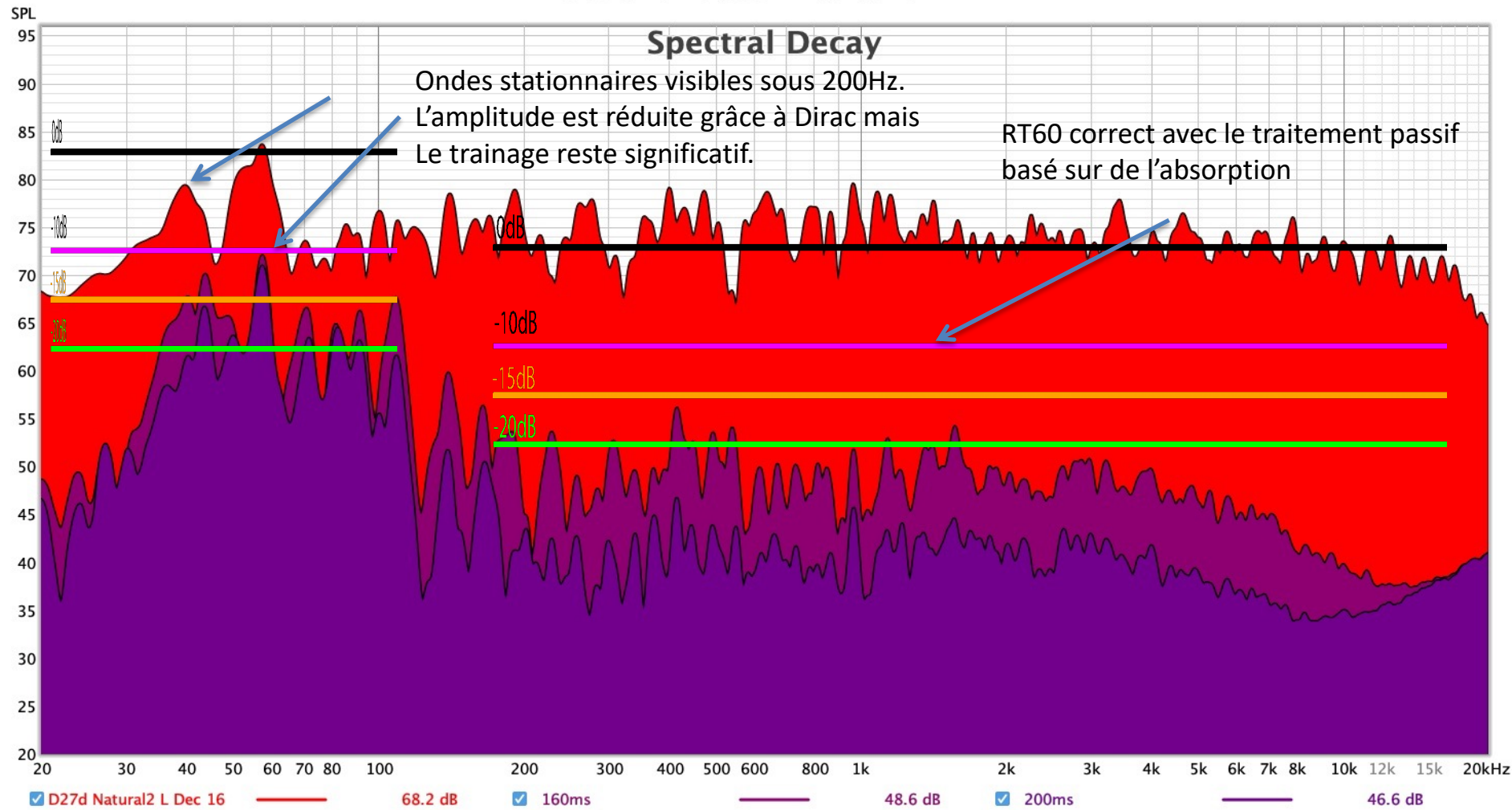
Traitement passif recommandé  
par GK acoustics + Vicoustic diffusion  
Correction numérique Dirac Live  
(même résultats acoustiques qu'avec Trinnov)



## Sous-sol pda0 – après traitement passif et correction numérique – Juillet 2017



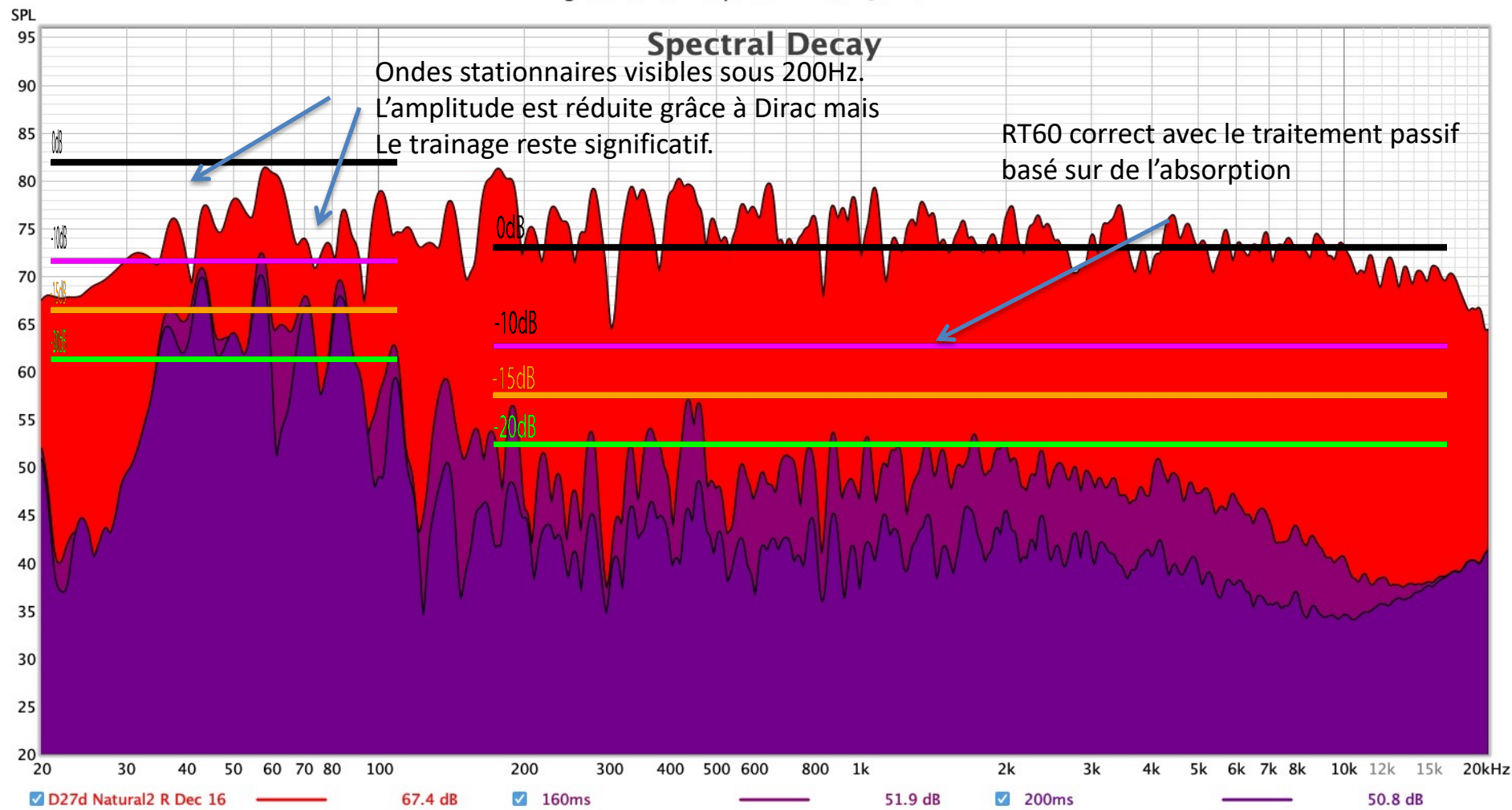
Left Channel – Giya G3 – Dirac – Jul 2017



- Les problèmes dans la zone modale de cette pièce restent présents. La correction numérique règle problème de l'amplitude, mais ne peut pas grand-chose sur le trainage.
- Le RT60 est correct dans la zone réverbérée, grâce au traitement passif amélioré.



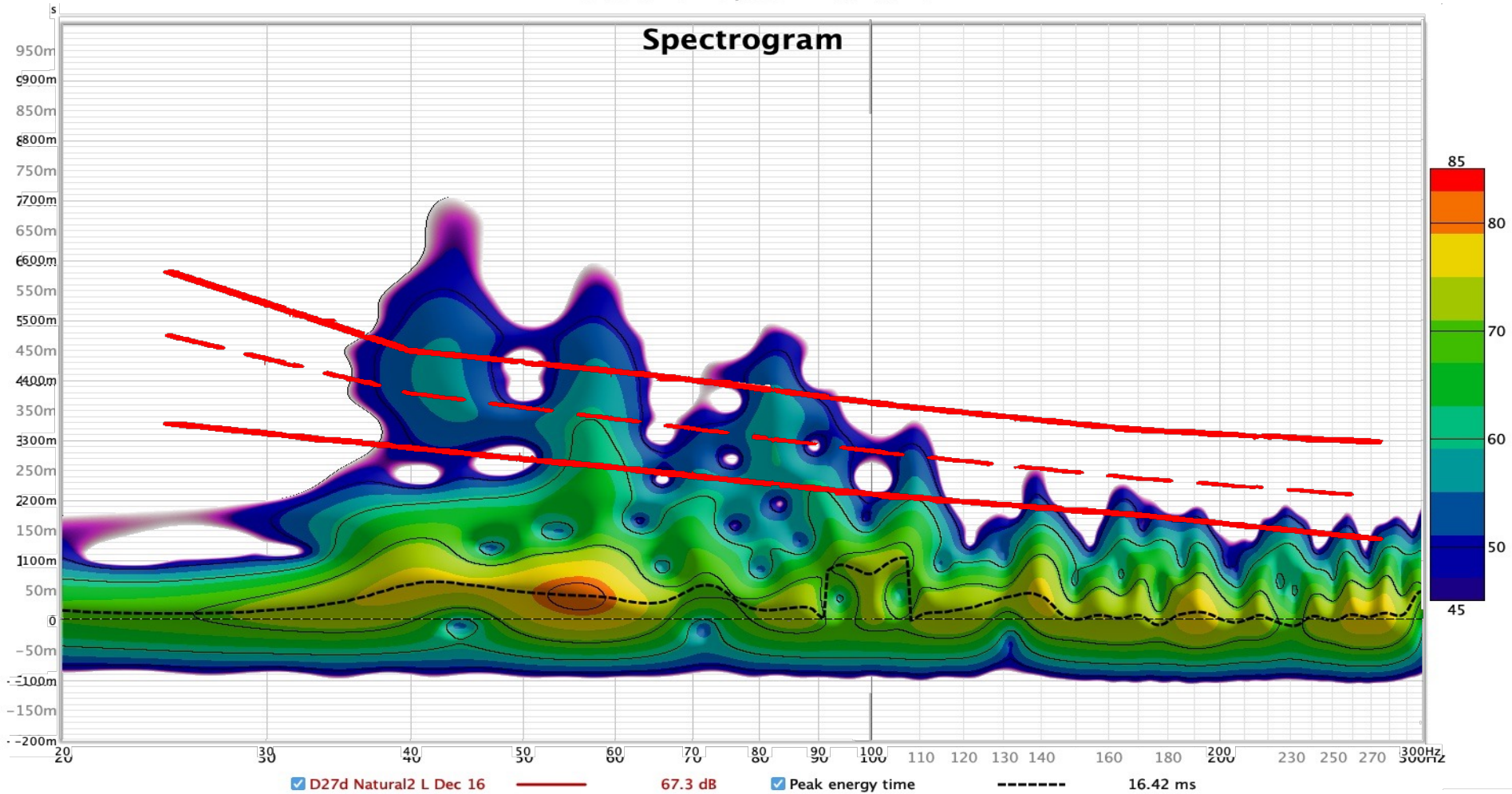
Right Channel – Giya G3 – Dirac – Jul 2017



- Même constat à droite.



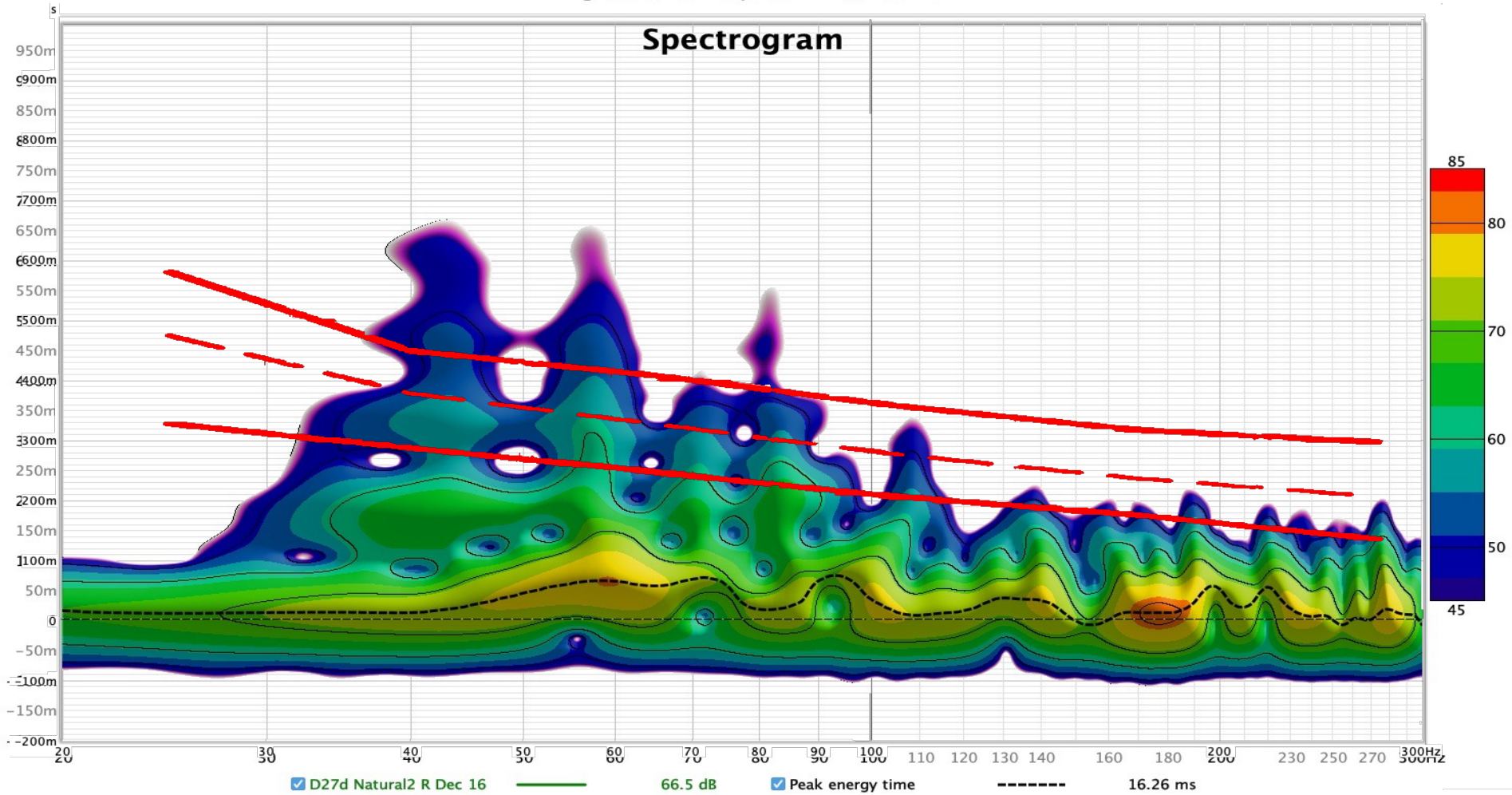
Left Channel - Giya G3 - Dirac - Jul 2017



- L'amélioration est nette avec la correction numérique, mais le trainage reste significatif, d'autant que l'amplitude a quand même été réduite très fortement.



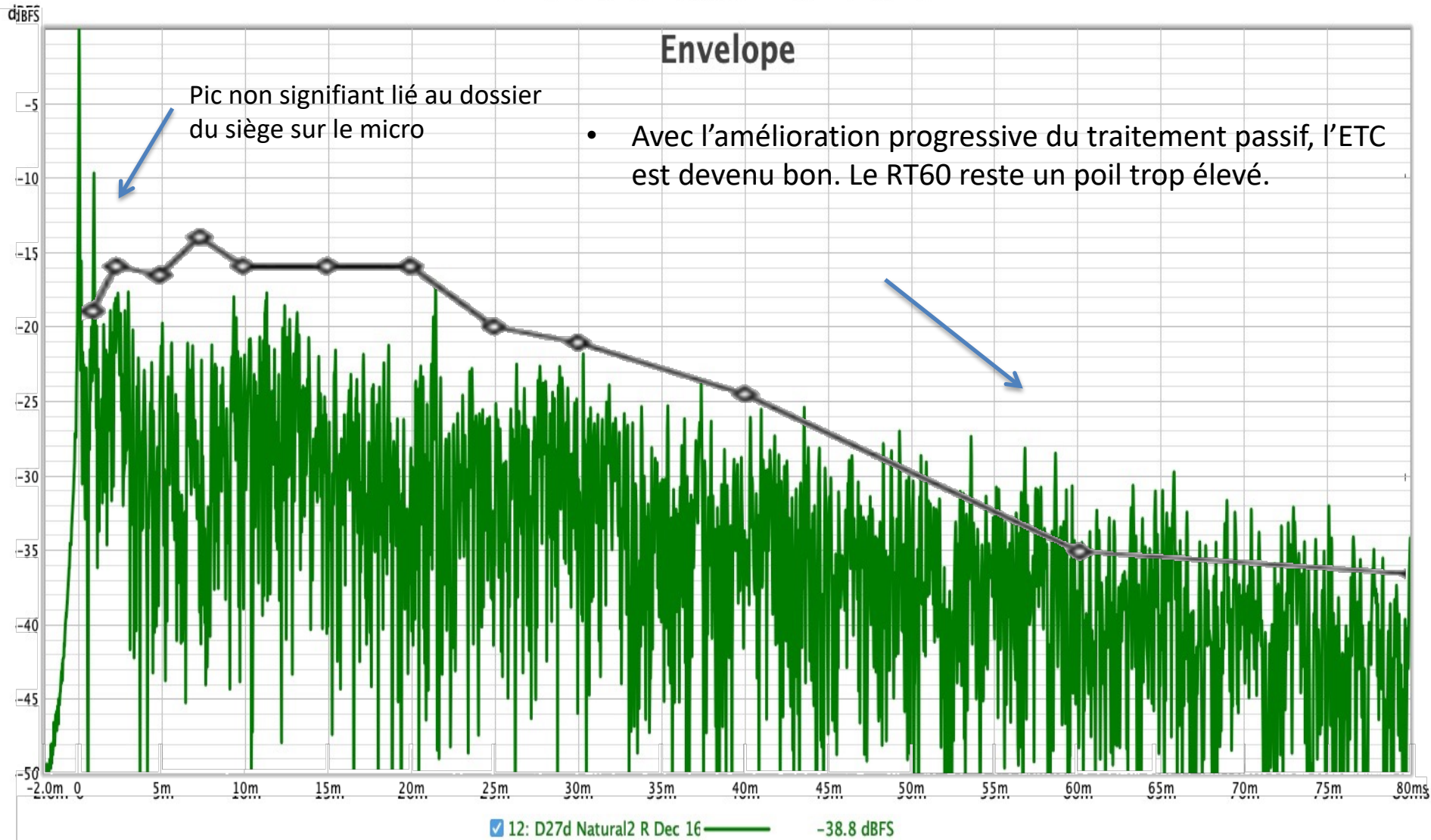
Right Channel – Giya G3 – Dirac – Jul 2017



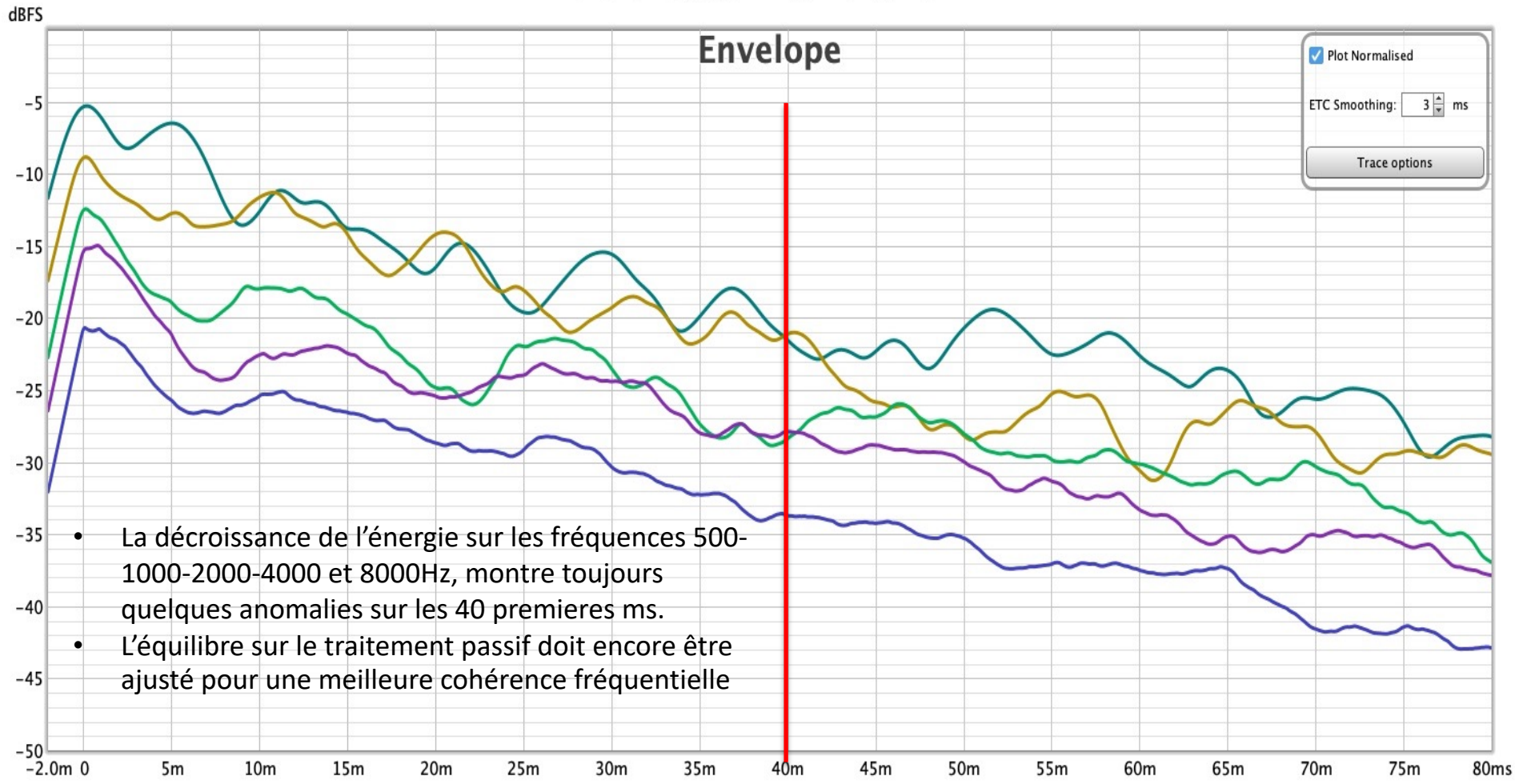
- Même constat à droite.



ETC - Both channels - Giya G3 - Dirac Live - Jul 2017



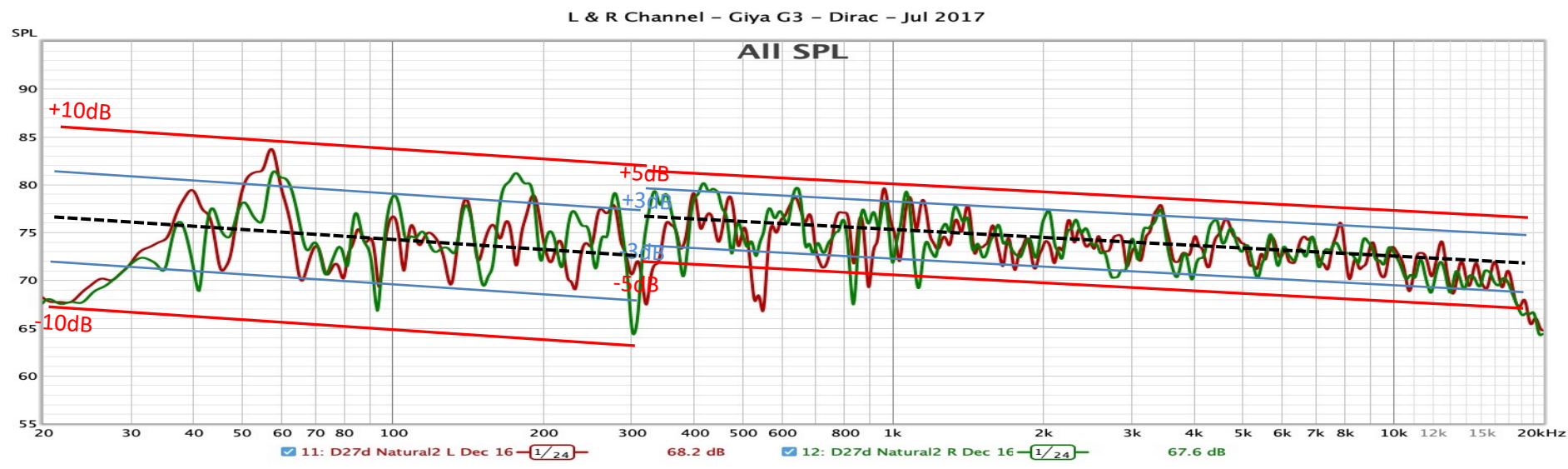
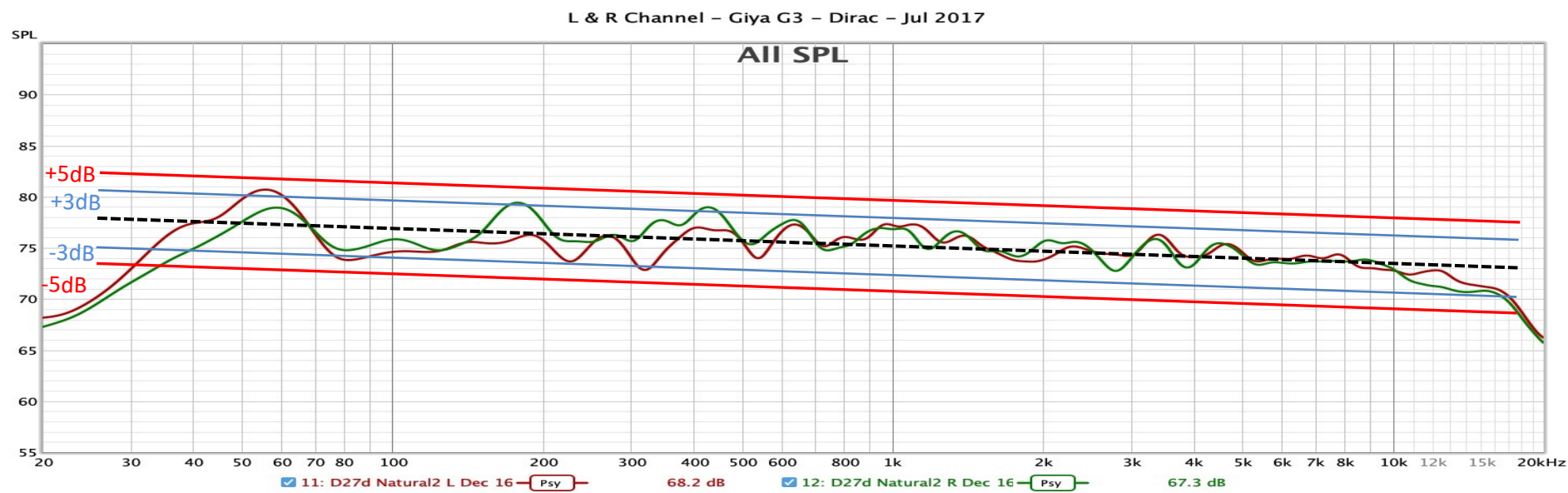
ETC 40ms - Giya G3 - Dirac Live - Jul 2017



<input checked="" type="checkbox"/> 51: D27d - 5...[500 Hz 1/1] -21.4 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 52: D27d - ...[1000 Hz 1/1] -26.4 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 53: D27d - ...[2000 Hz 1/1] -29.6 dBFS
<input checked="" type="checkbox"/> 54: D27d - ...[4000 Hz 1/1] -31.5 dBFS	<input checked="" type="checkbox"/> 55: D27d - ...[8000 Hz 1/1] -37.3 dBFS	



# 2017 Sous-sol pda0 – après traitement passif et correction numérique – Juillet 2017



Ces mesures d'amplitude/fréquence sont très bonnes grâce à la correction numérique Dirac Live. L'amplitude des modes est très réduite, et la faible réduction du trainage est compensée par une atténuation très forte de l'amplitude sous 40Hz.



# Juillet 2019

Traitement passif amélioré

GIK acoustics + Vicoustic + diffusion plafond

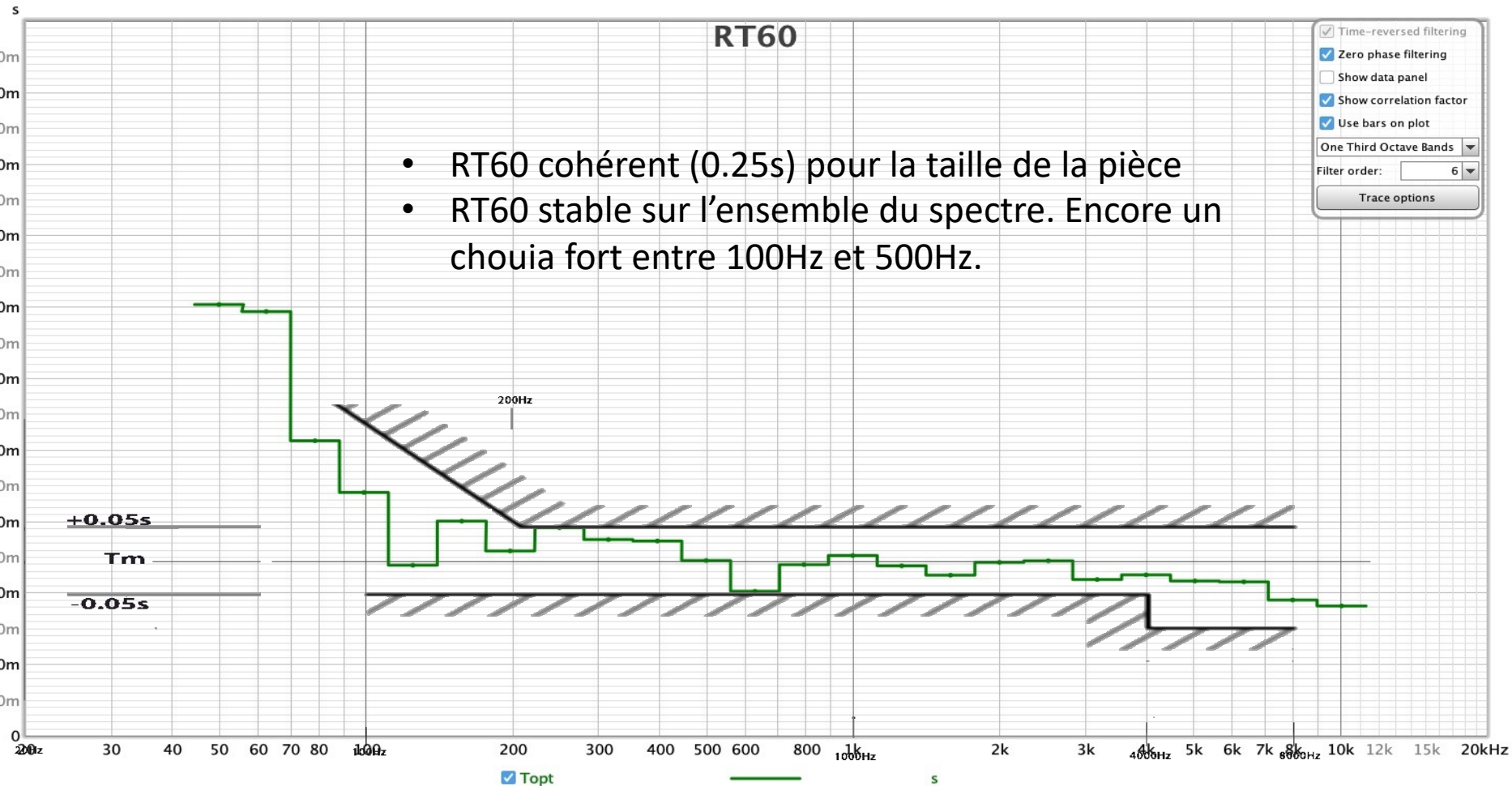
**et Basstraps à Membrane**

Correction numérique RePhase

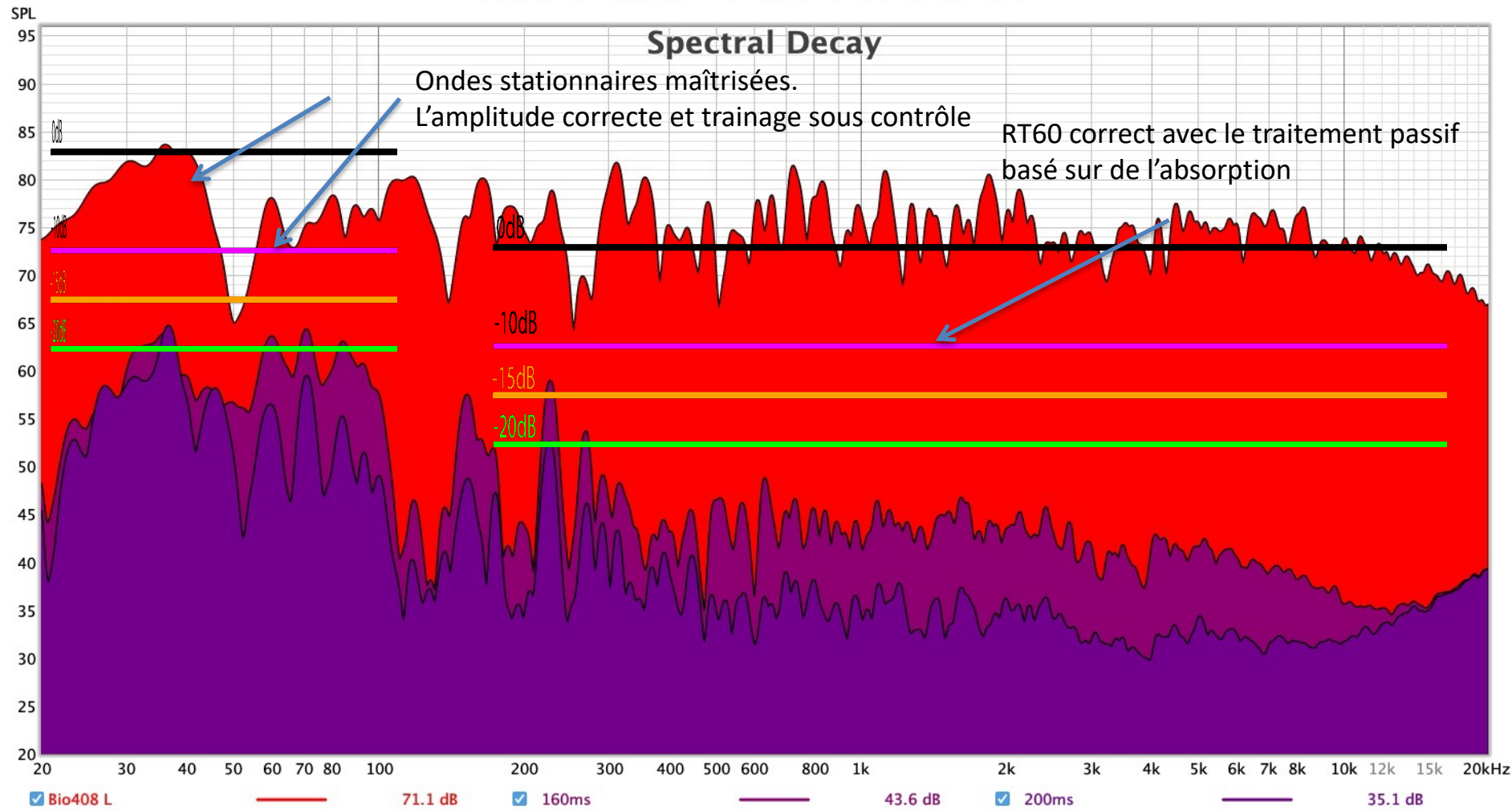
(en dessous de 85Hz uniquement)



- RT60 cohérent (0.25s) pour la taille de la pièce
- RT60 stable sur l'ensemble du spectre. Encore un chouia fort entre 100Hz et 500Hz.



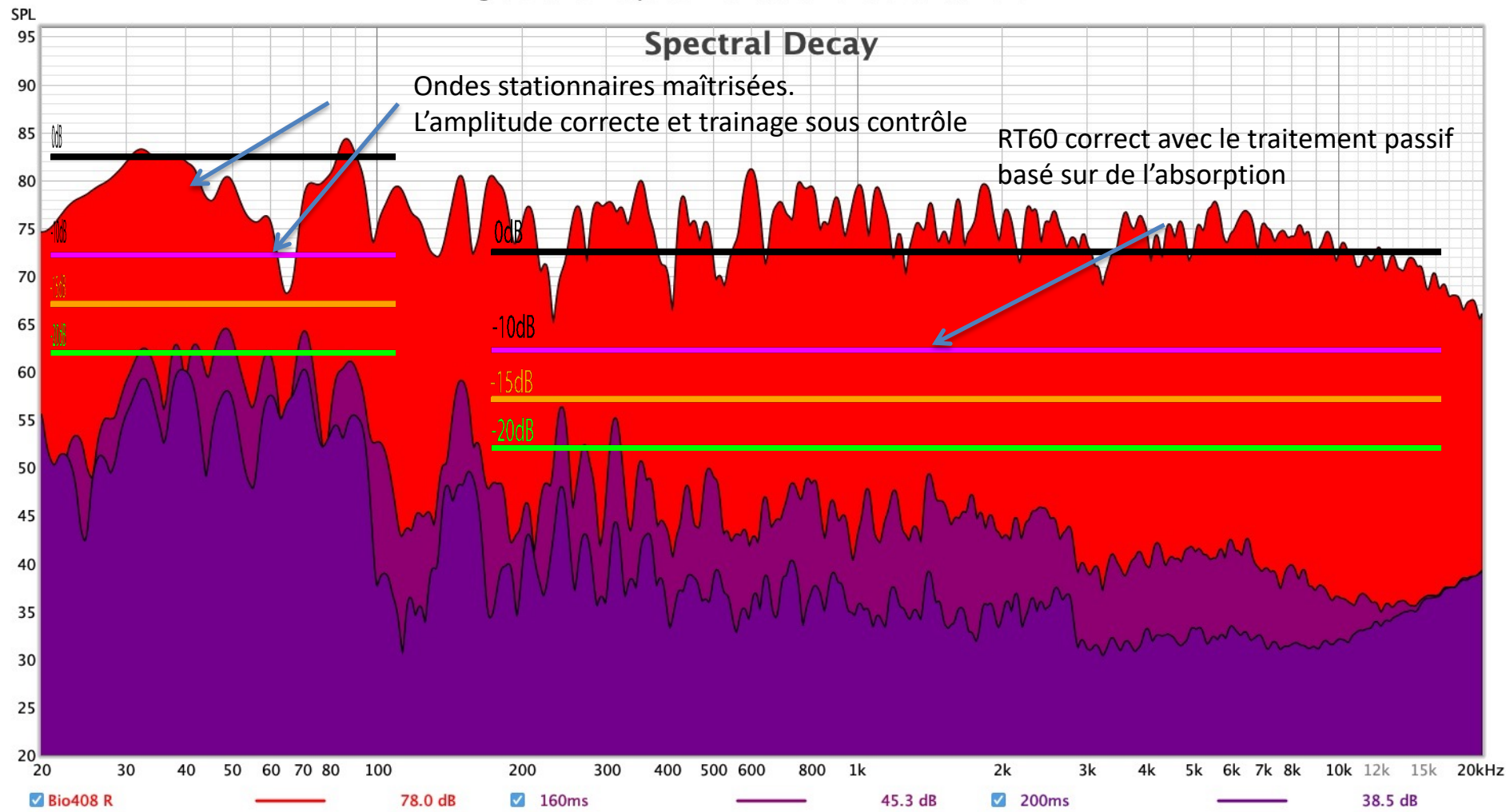
Left Channel – Giya G3 – RePhase & Membranes – Jul 2019



- Les problèmes dans la zone modale de cette pièce restent présents. La correction numérique règle problème de l'amplitude, et les basstraps à membrane traitent le trainage.
- Le RT60 est correct dans la zone réverbérée, grâce au traitement passif amélioré.



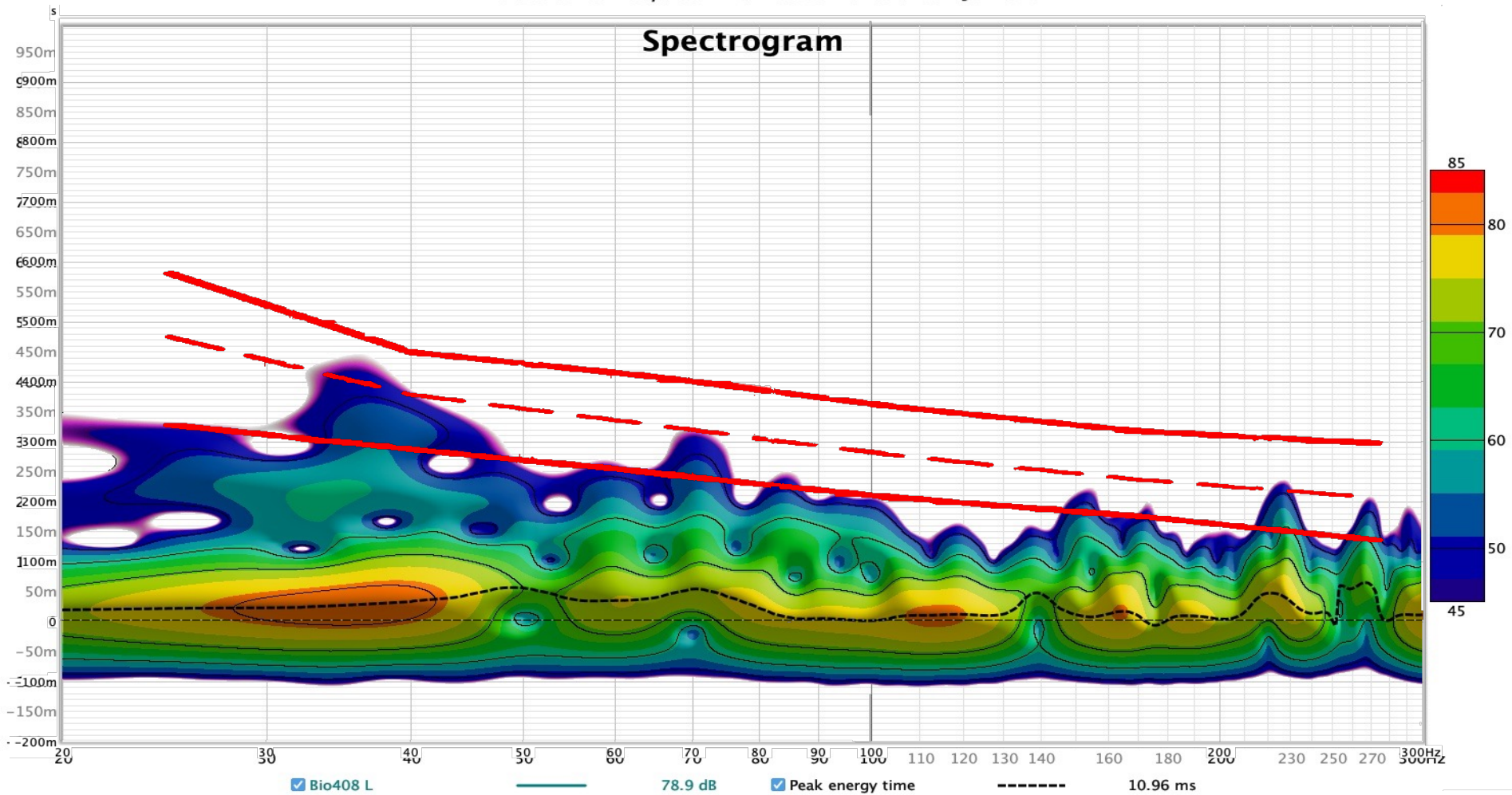
Right Channel – Giya G3 – RePhase & Membranes – Jul 2019



- Même constat à droite.



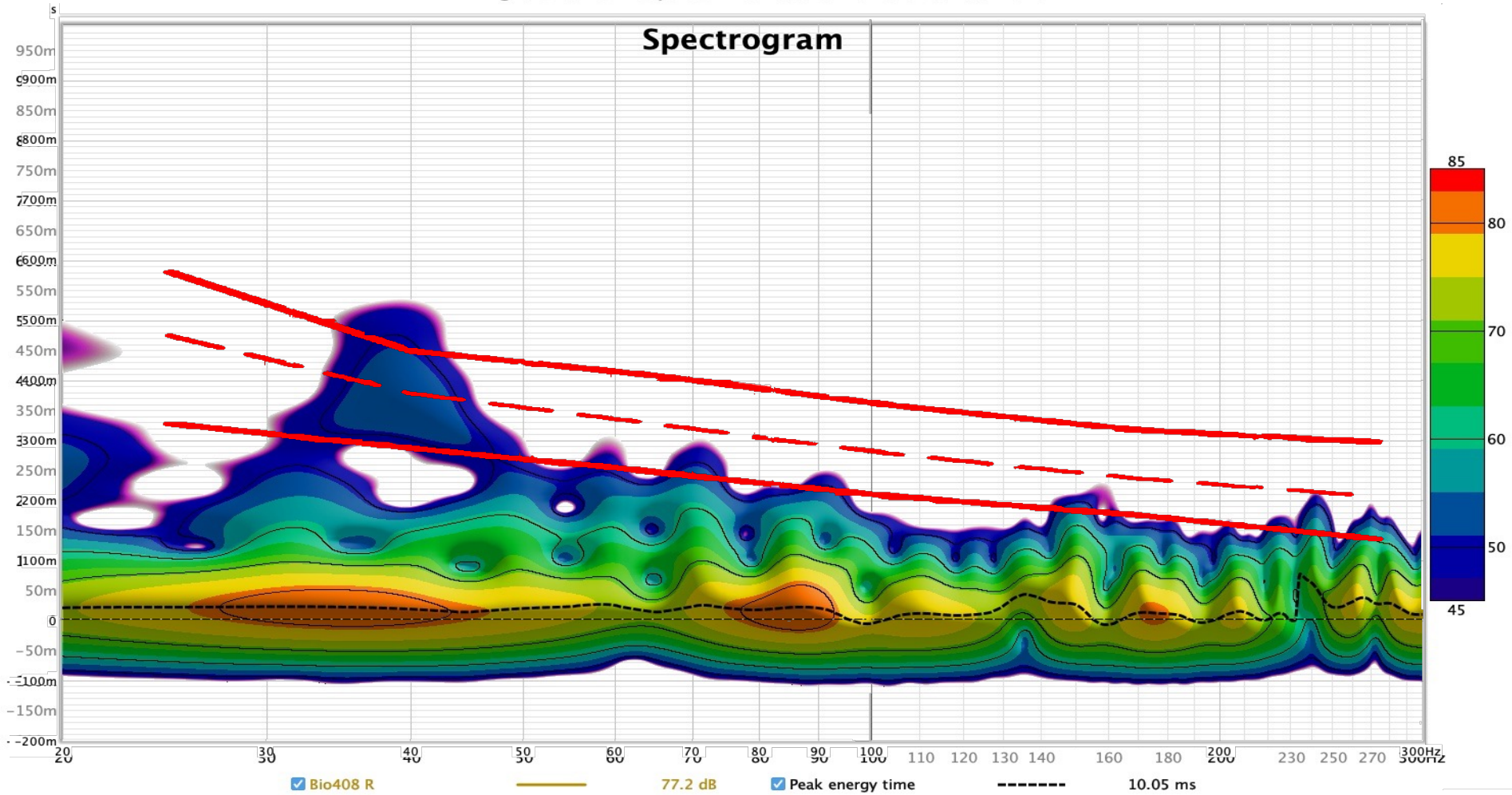
Left Channel – Giya G3 – RePhase & Membranes – Jul 2019



- L'amélioration est nette avec la correction numérique, et les basstraps à membrane qui on réglé le trainage sans qu'il y ait besoin de réduire l'amplitude fortement.



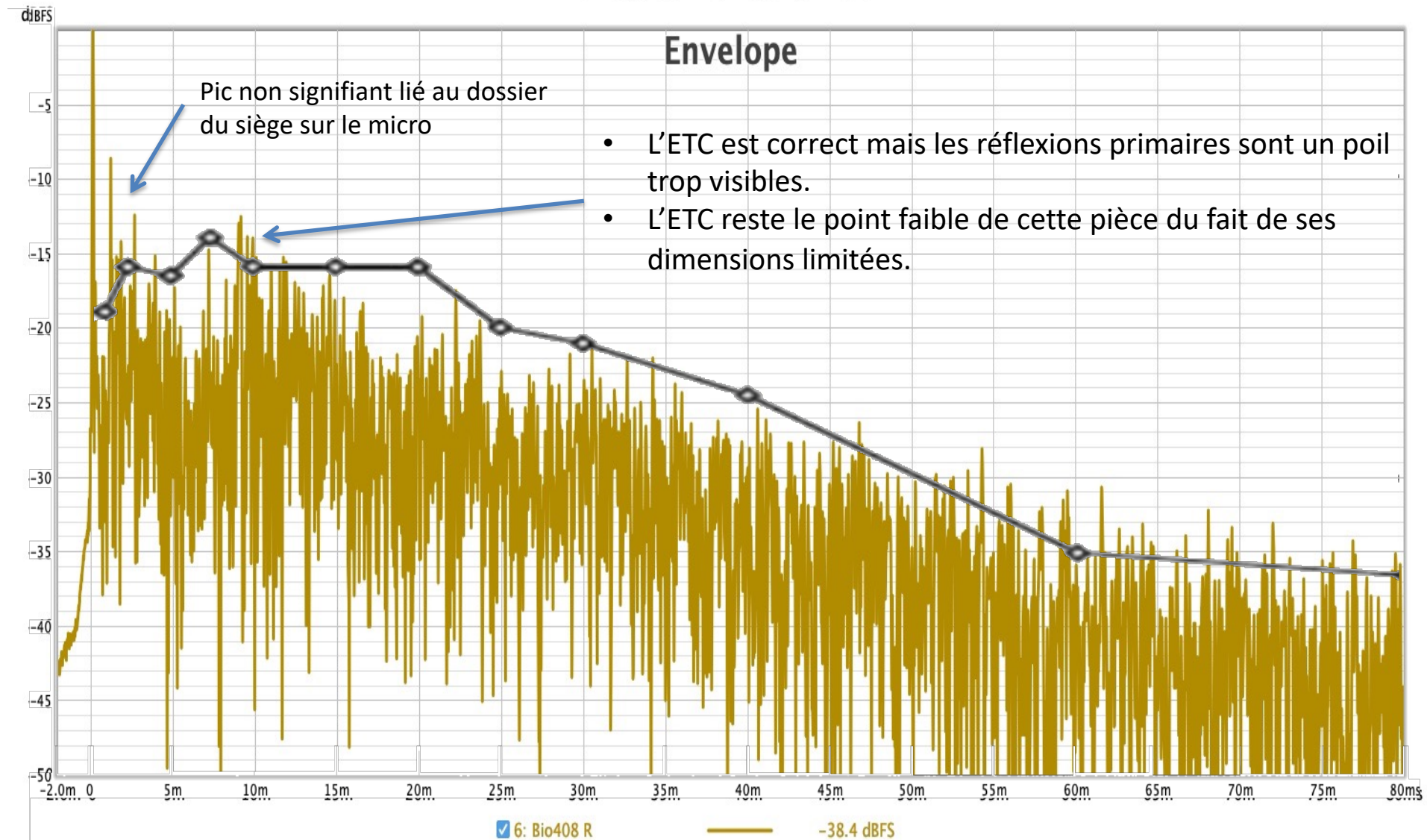
Right Channel – Giya G3 – RePhase & Membranes – Jul 2019



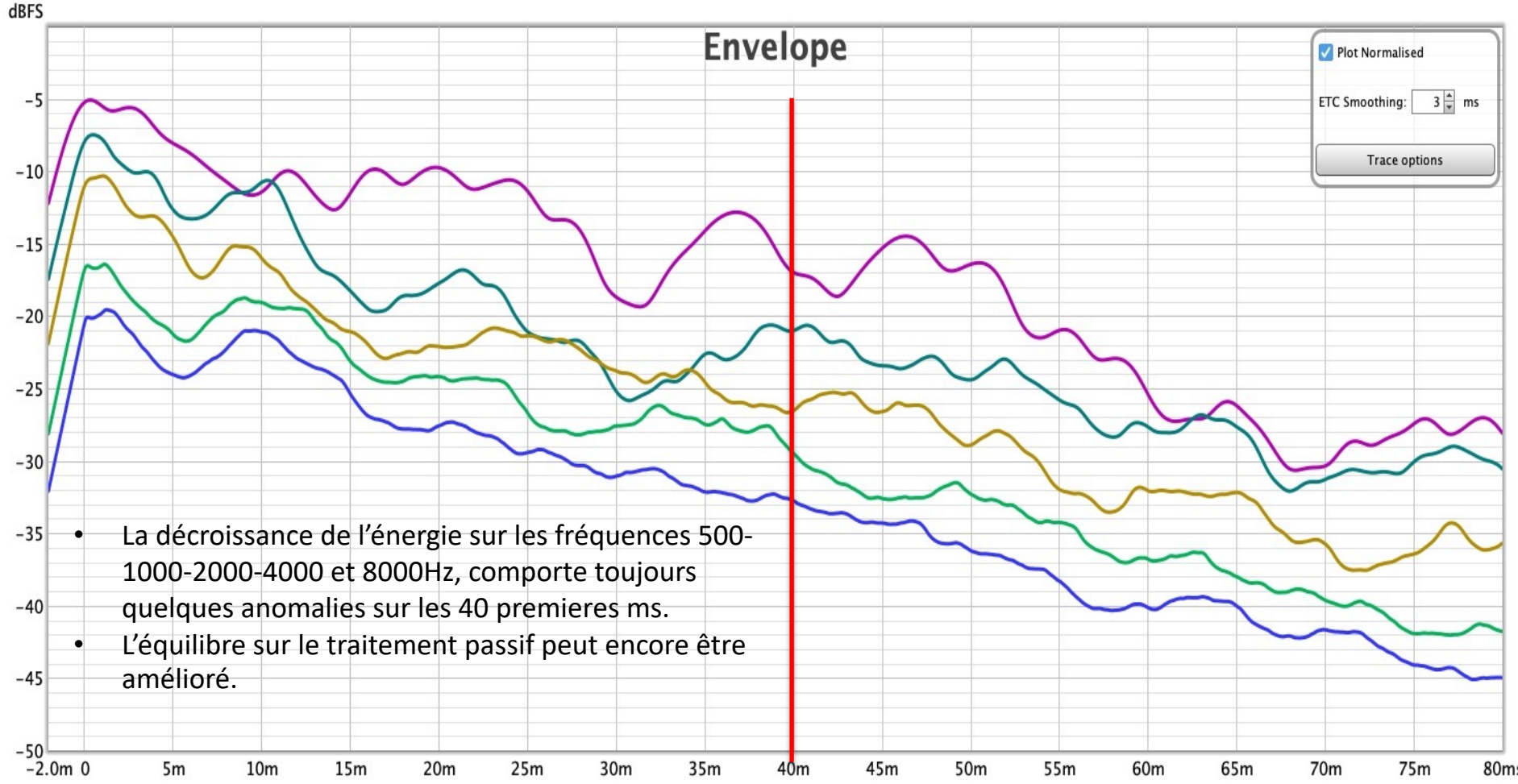
- Même constat à droite.



ETC - Giya G3 - RePhase - Juil 2019



ETC 40ms - Giya G3 - Juillet 2019



- La décroissance de l'énergie sur les fréquences 500-1000-2000-4000 et 8000Hz, comporte toujours quelques anomalies sur les 40 premières ms.
- L'équilibre sur le traitement passif peut encore être amélioré.

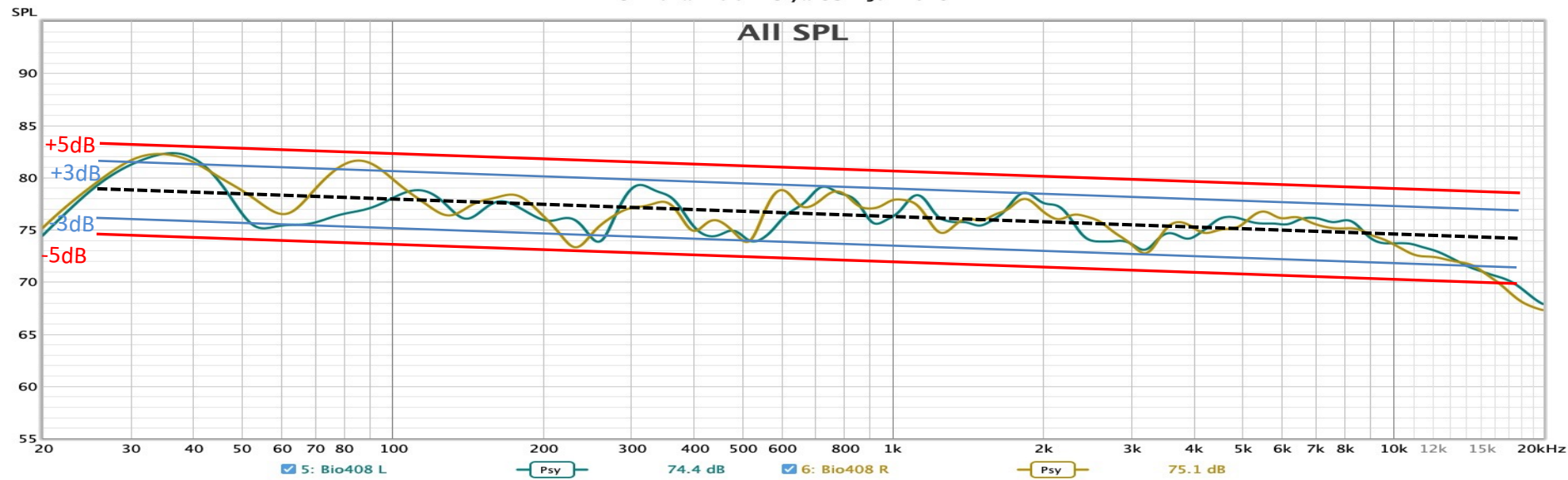
Plot Normalised

ETC Smoothing: 3 ms

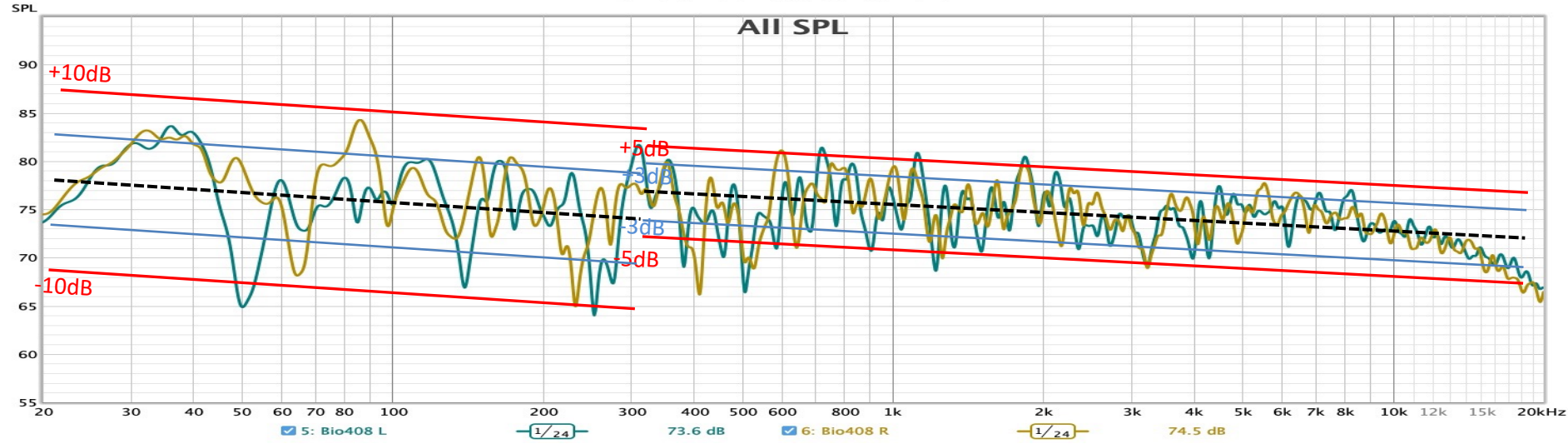
Trace options



L & R channels – Giya G3 – Jul 2019



L & R channels – Giya G3 – Jul 2019



Ces mesures d'amplitude/fréquence sont très bonnes grâce à la correction numérique RePhase appliquée uniquement sous 85Hz. L'amplitude des modes peut être faiblement réduite grâce aux basstraps à membrane.



# Juillet 2021

Traitement passif amélioré

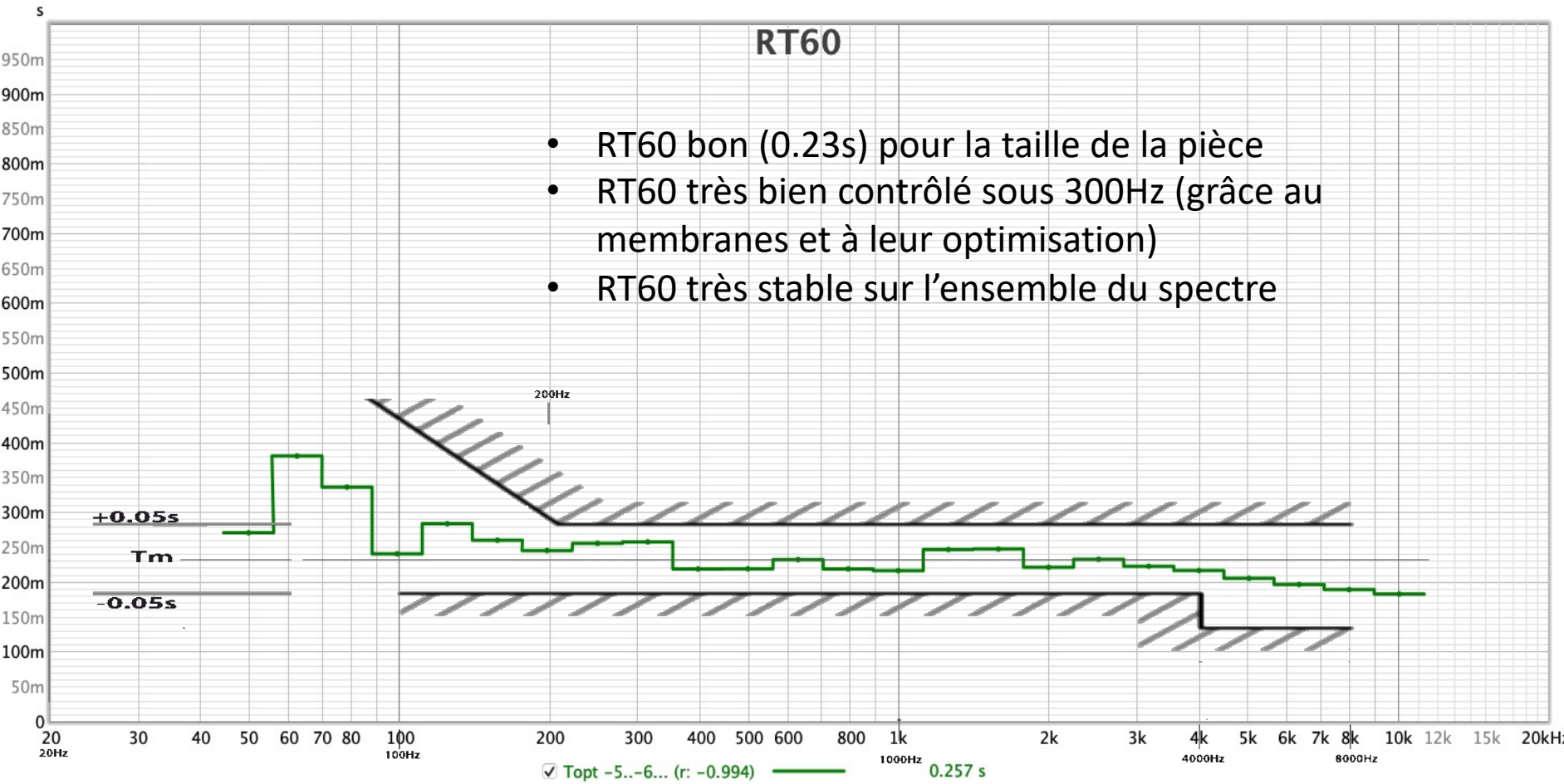
GIK acoustics + Vicoustic + diffusion plafond

**et Basstraps à Membrane optimisés**

Aucune Correction numérique



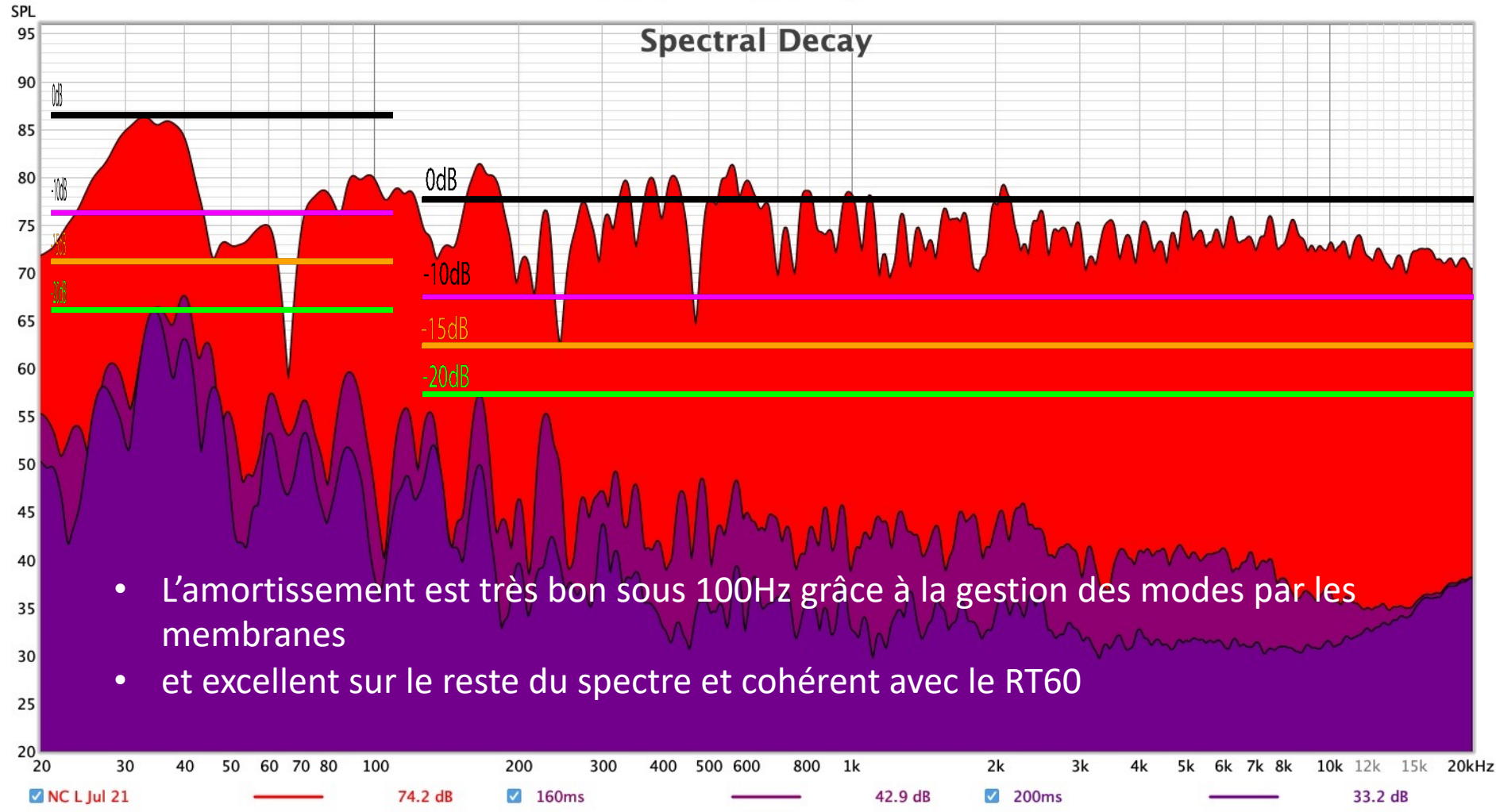
Sous-sol pda0 – après traitement passif 2021



- RT60 bon (0.23s) pour la taille de la pièce
- RT60 très bien contrôlé sous 300Hz (grâce aux membranes et à leur optimisation)
- RT60 très stable sur l'ensemble du spectre



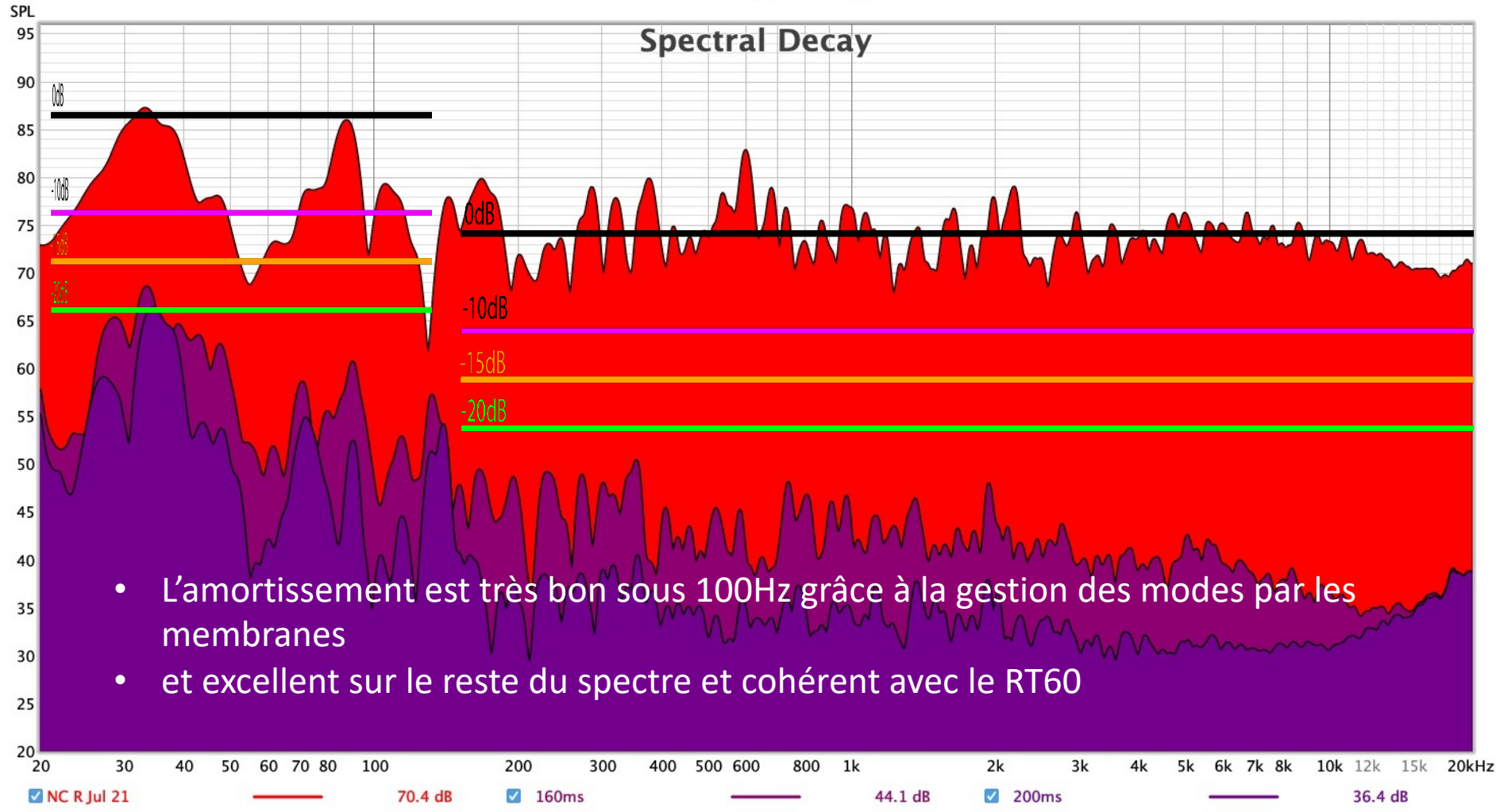
Left Channel – Giya G3 – Aug 21



- La gestion du grave est très bonne avec de l'impact et de l'articulation. Et la correction numérique n'est plus nécessaire pour avoir un amortissement très bon dans le grave, avec l'optimisation des membranes. Le traitement passif complémentaire pour le trainage sur la zone 70-100Hz est essentiel pour la lisibilité du grave.



Right Channel - Giya G3 - Aug 21



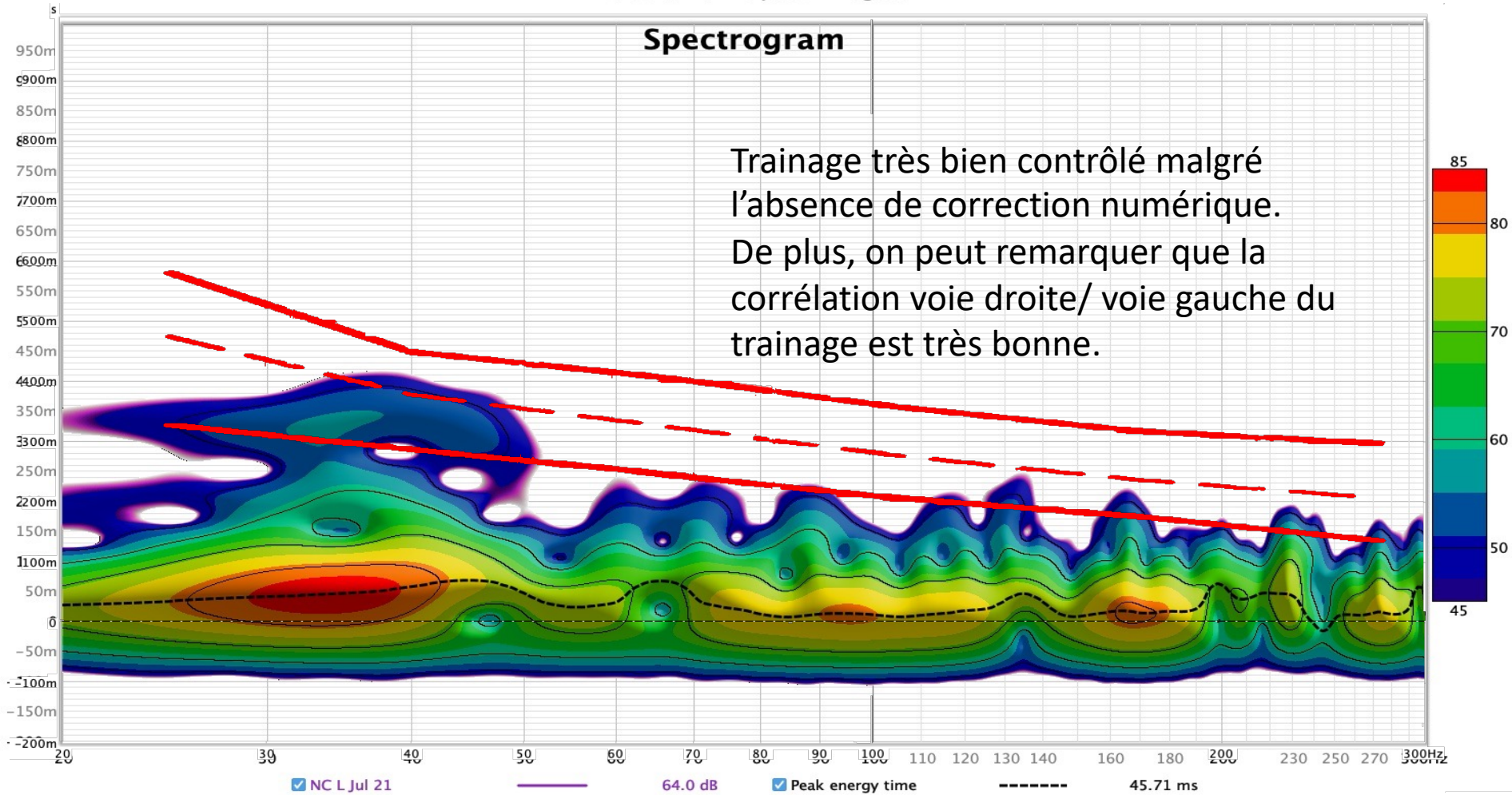
- Même constat à droite.



Left Channel - Giya G3 - August 21

### Spectrogram

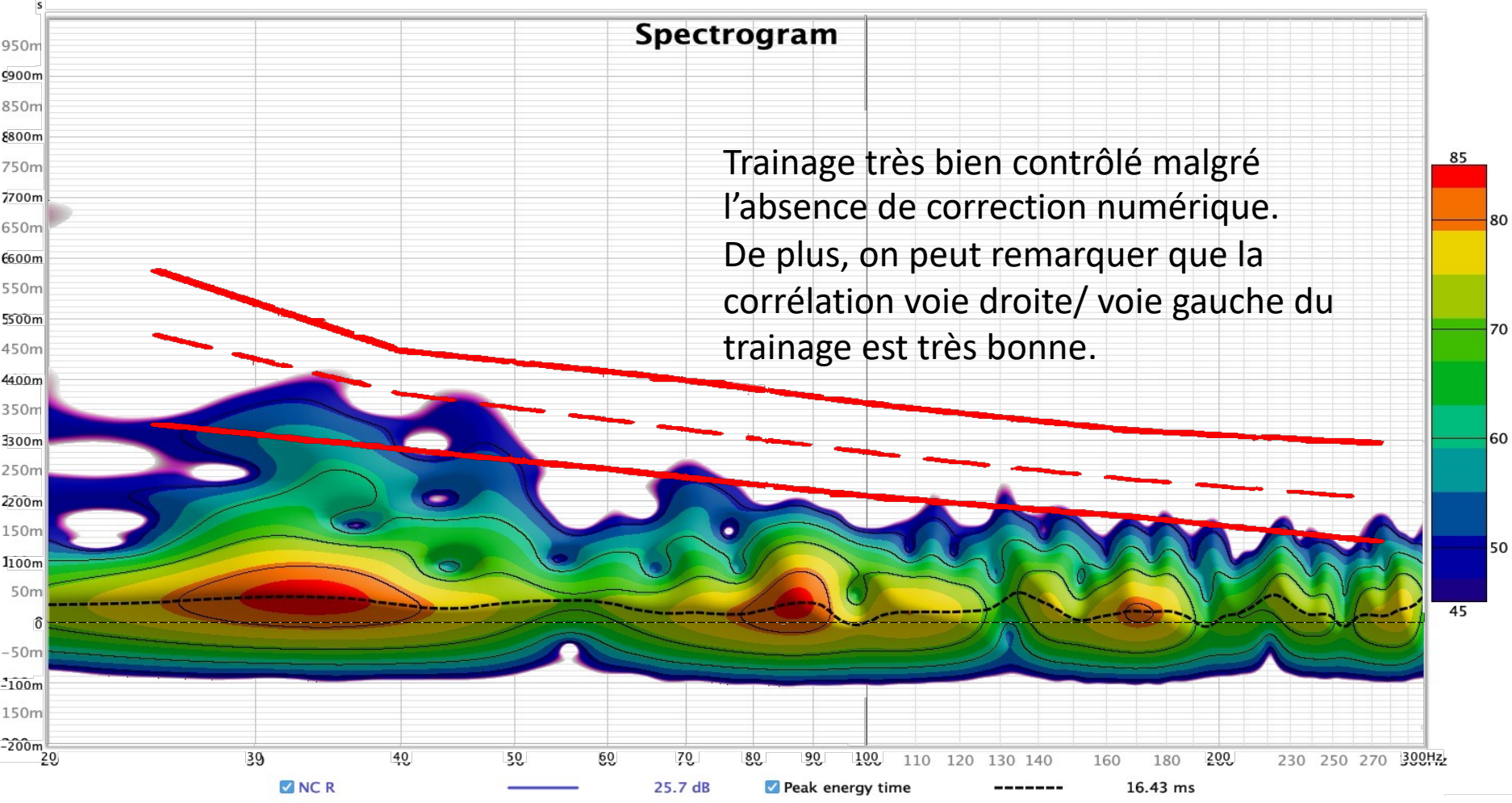
Trainage très bien contrôlé malgré l'absence de correction numérique. De plus, on peut remarquer que la corrélation voie droite/ voie gauche du trainage est très bonne.

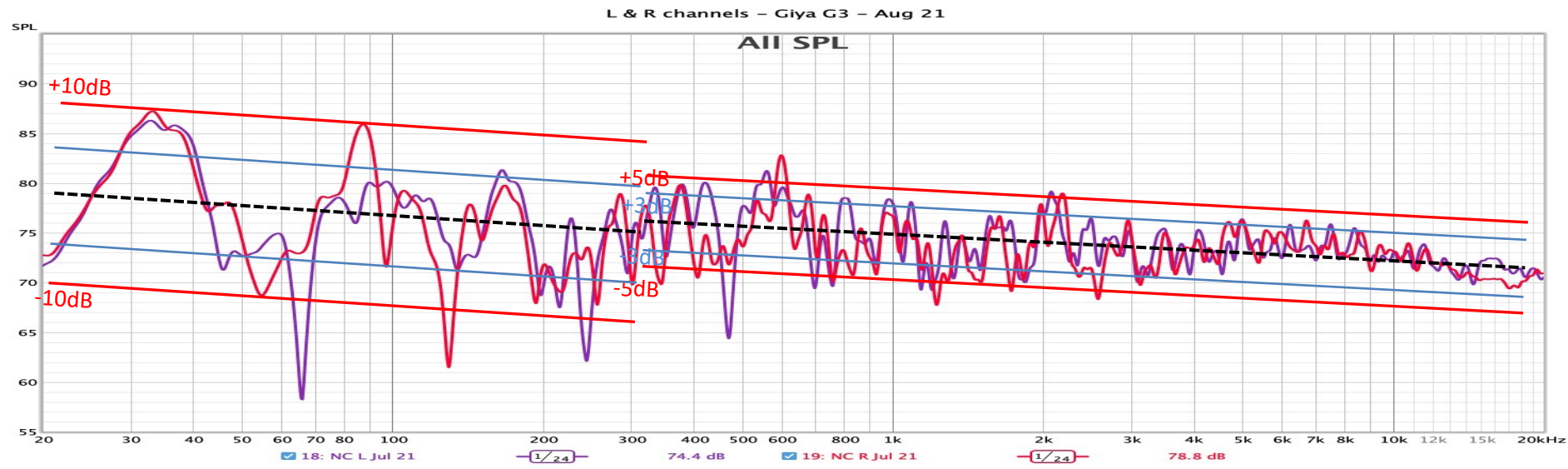
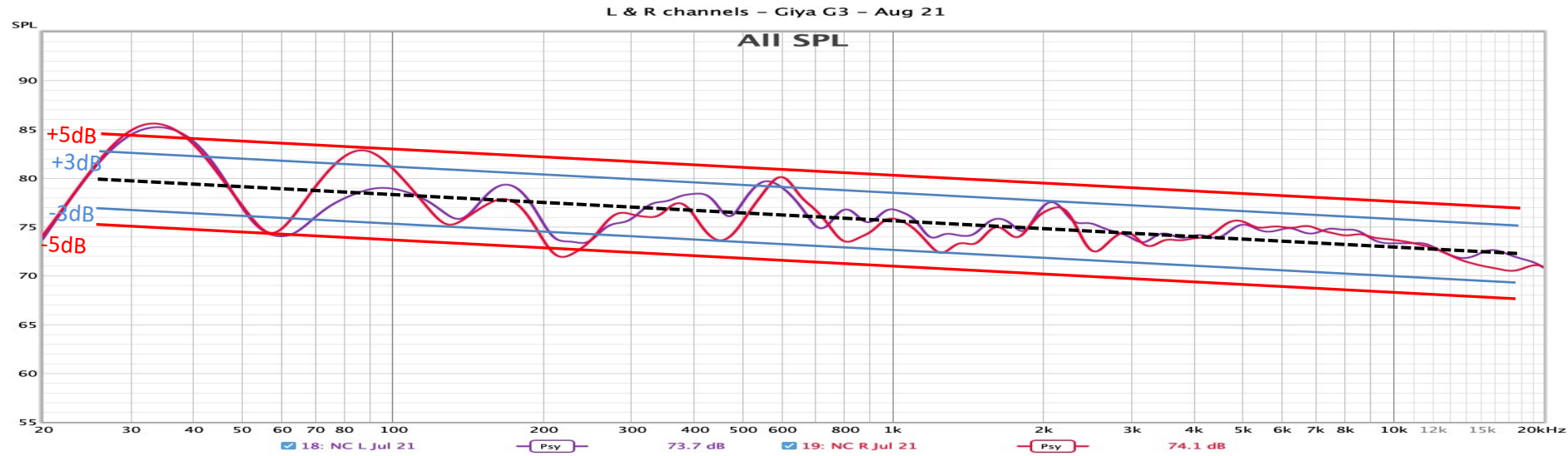


Right channel - Giya G3 - Aug 2021

### Spectrogram

Trainage très bien contrôlé malgré l'absence de correction numérique.  
 De plus, on peut remarquer que la corrélation voie droite/ voie gauche du trainage est très bonne.

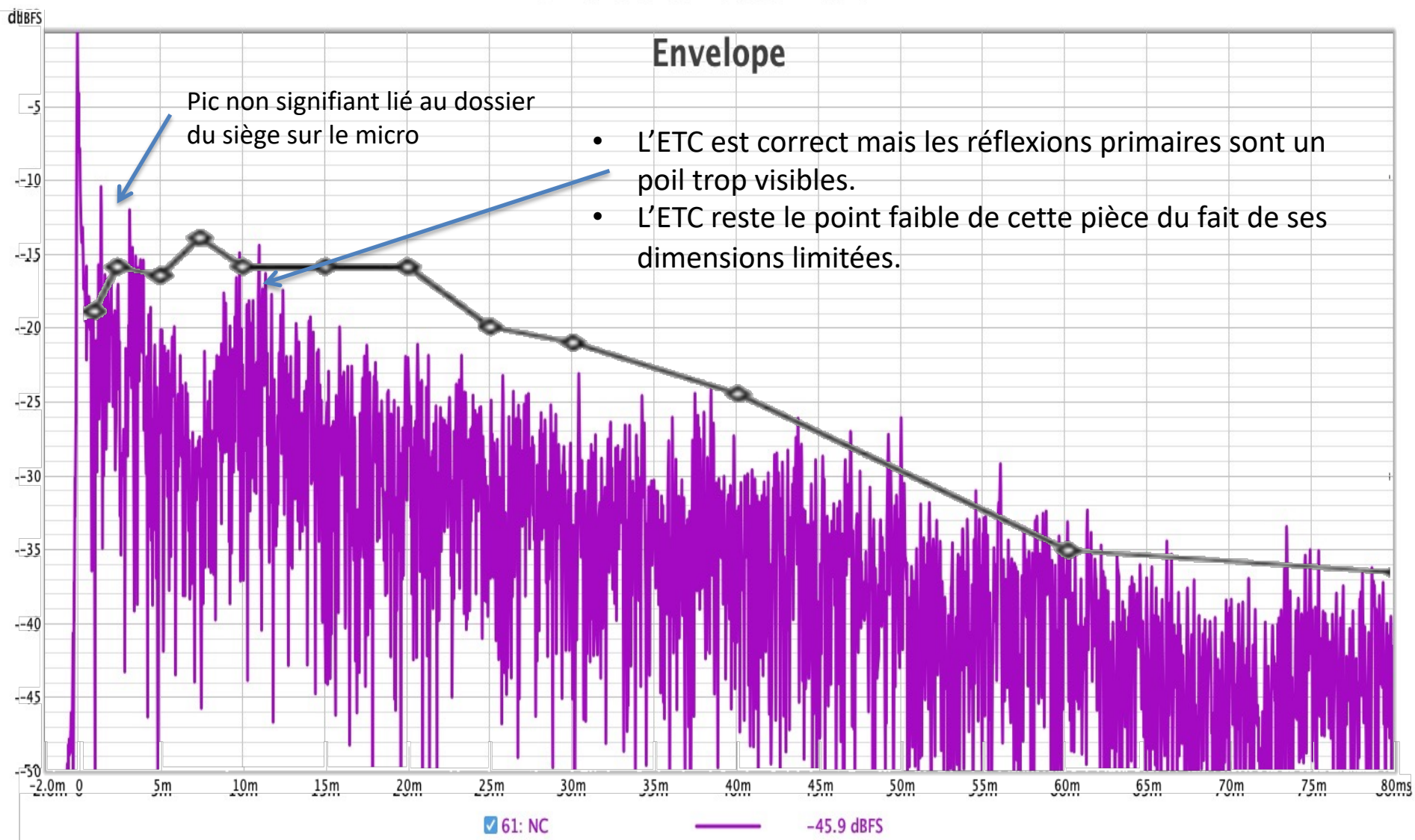




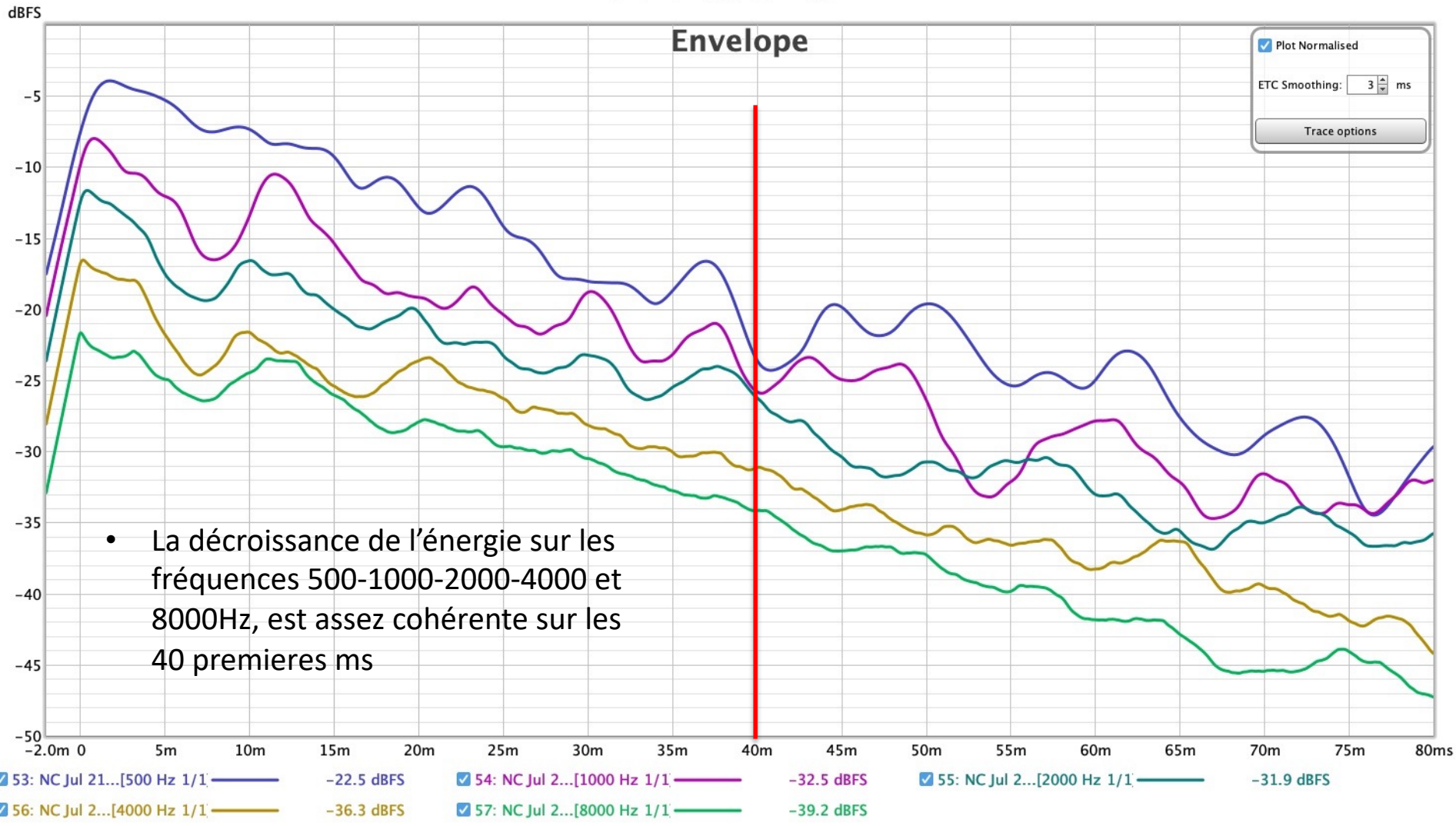
Ces mesures d'amplitude/fréquence sont très bonnes d'autant qu'elles sont obtenues sans aucune correction numérique. La cohérence droite/gauche est exceptionnelle malgré les difficultés inhérentes à la pièce.



ETC - Both channels - Giya G3 - Aug 2021



ETC 40ms – Giya G3 – Aug 21

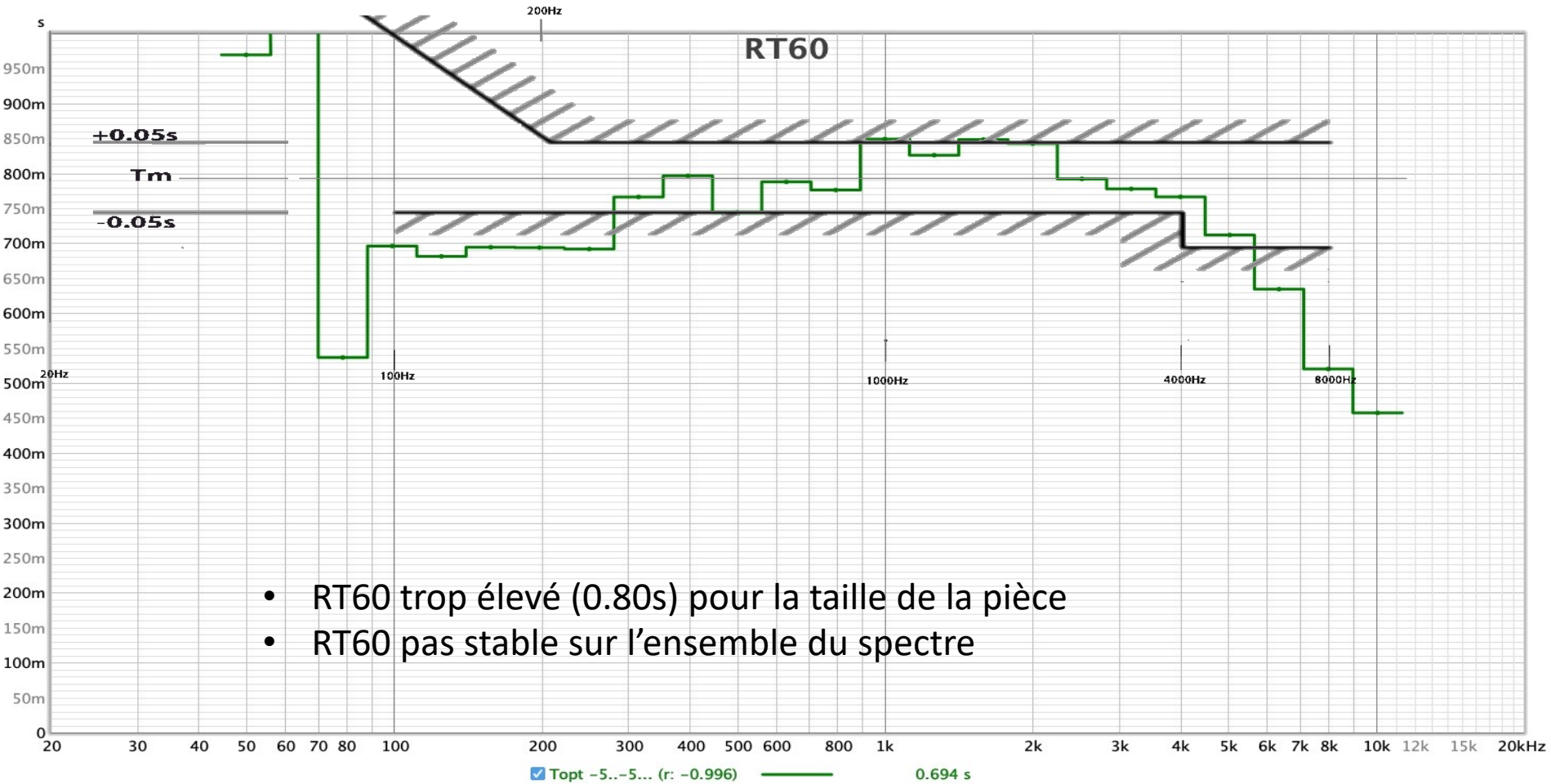


# Salon ordinaire – Apertura Thema

juil-21	
<b>Dimensions pièce d'écoute</b>	
Longueur (m)	8,00
Largeur (m)	4,50
Hauteur (m)	3,00
Volume (m3)	108
<b>Enceintes</b>	
Marque	<b>Apertura</b>
Modèle	<b>Thema</b>
Dispersion Horizontale (degrés)	90
Dispersion verticale (degrés)	80
<b>Traitement passif</b>	
	Non
<b>Correction Numérique</b>	
	Non
<b>RT60</b>	
Idéal = Tm (s)	0,308
moyen mesuré (s)	0,800
<b>Fréquence Schroeder</b>	
pour Tm (Hz)	107
pour RT60 mesuré (Hz)	172
<b>Distance Critique</b>	
pour Tm (m)	3,48
pour RT60 mesuré (m)	1,84

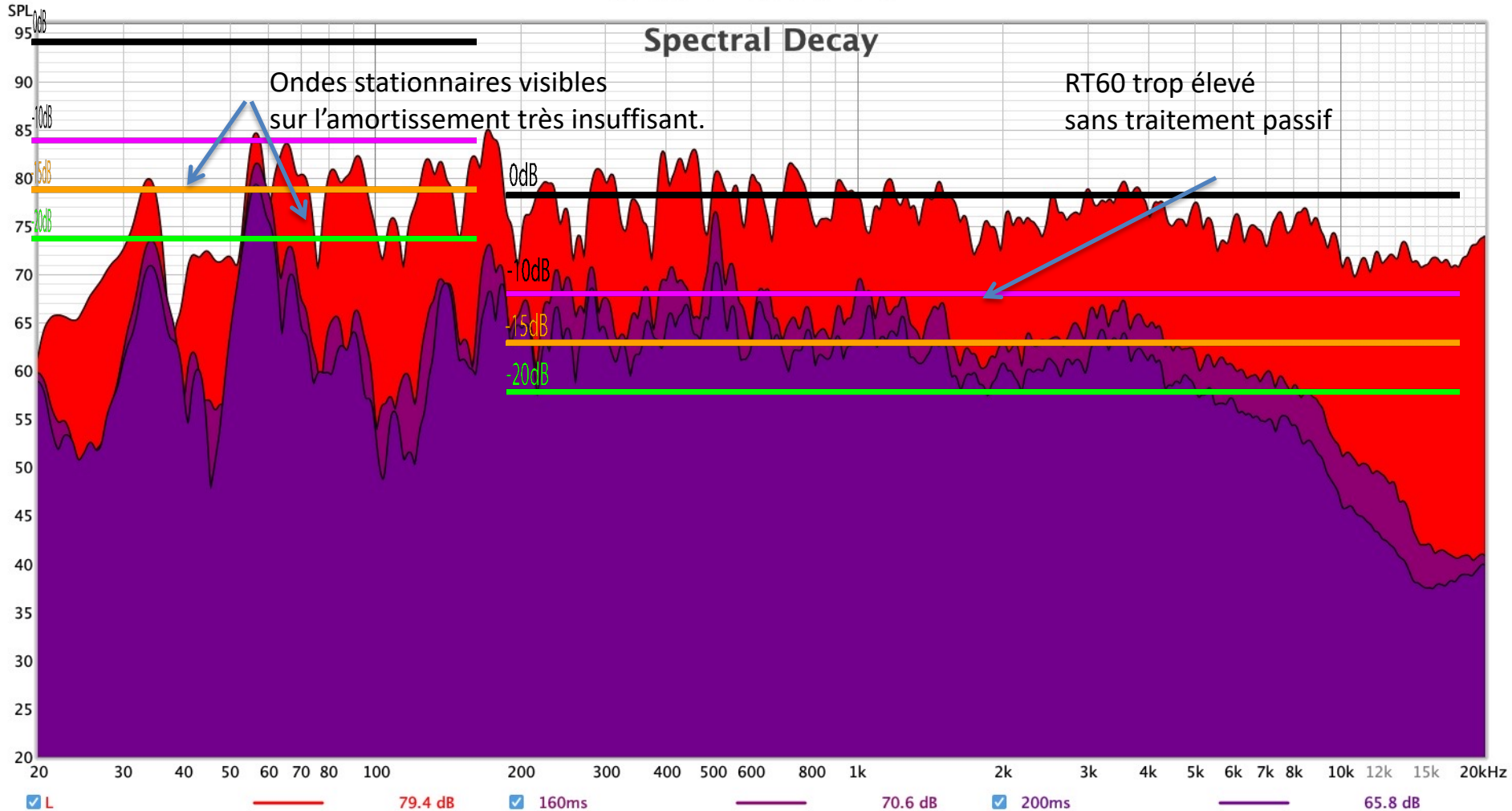


## Apertura Thema - Salon



# Apertura Thema - Salon

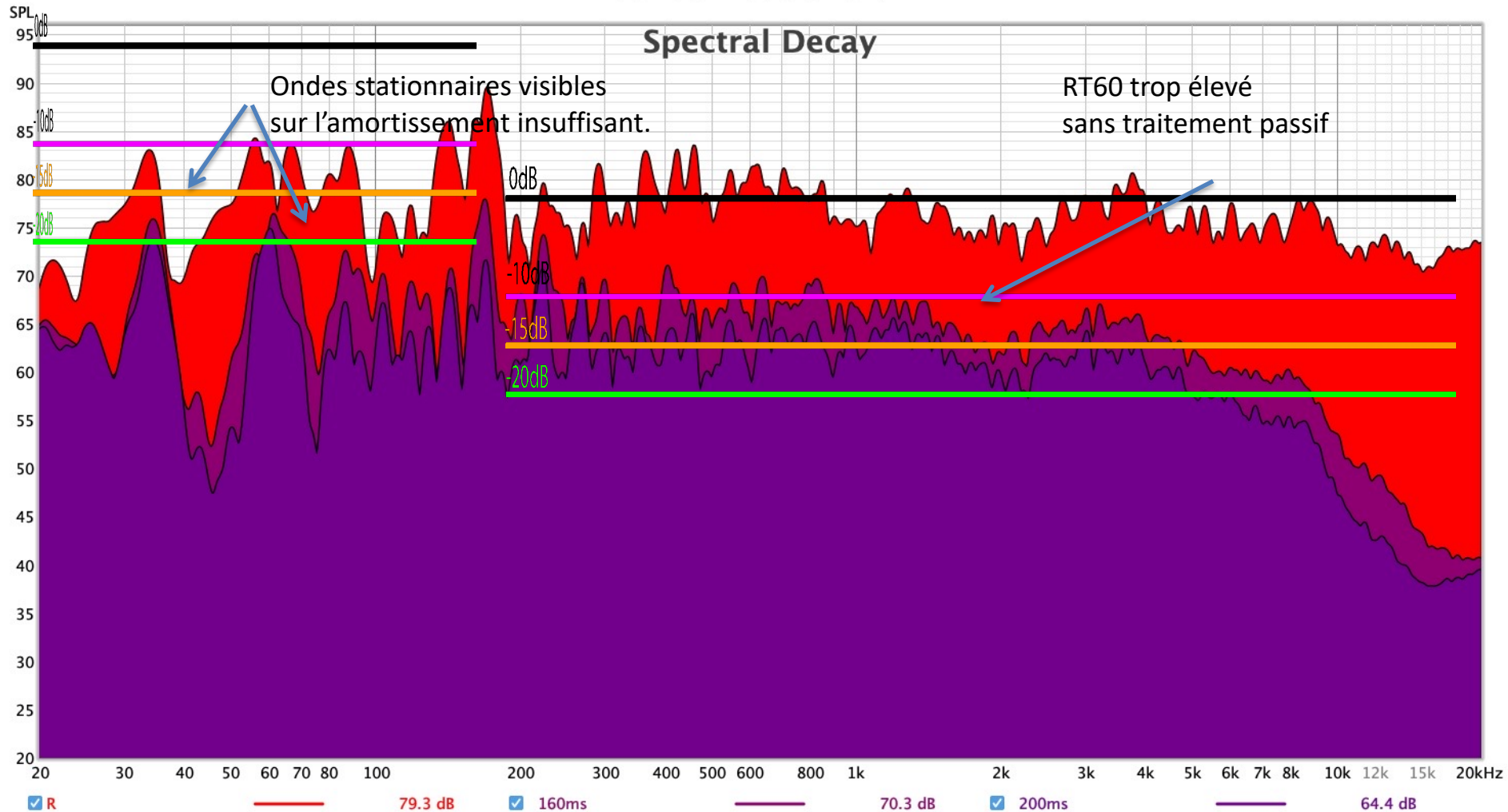
Voie Gauche - Apertura Thema



- Les modes sont présents mais peu envahissants en amplitude. Le trainage reste important.
- Le RT60 est trop élevé entraînant un amortissement insuffisant et une perte de dynamique.

# Apertura Thema - Salon

Voie Droite – Apertura Thema



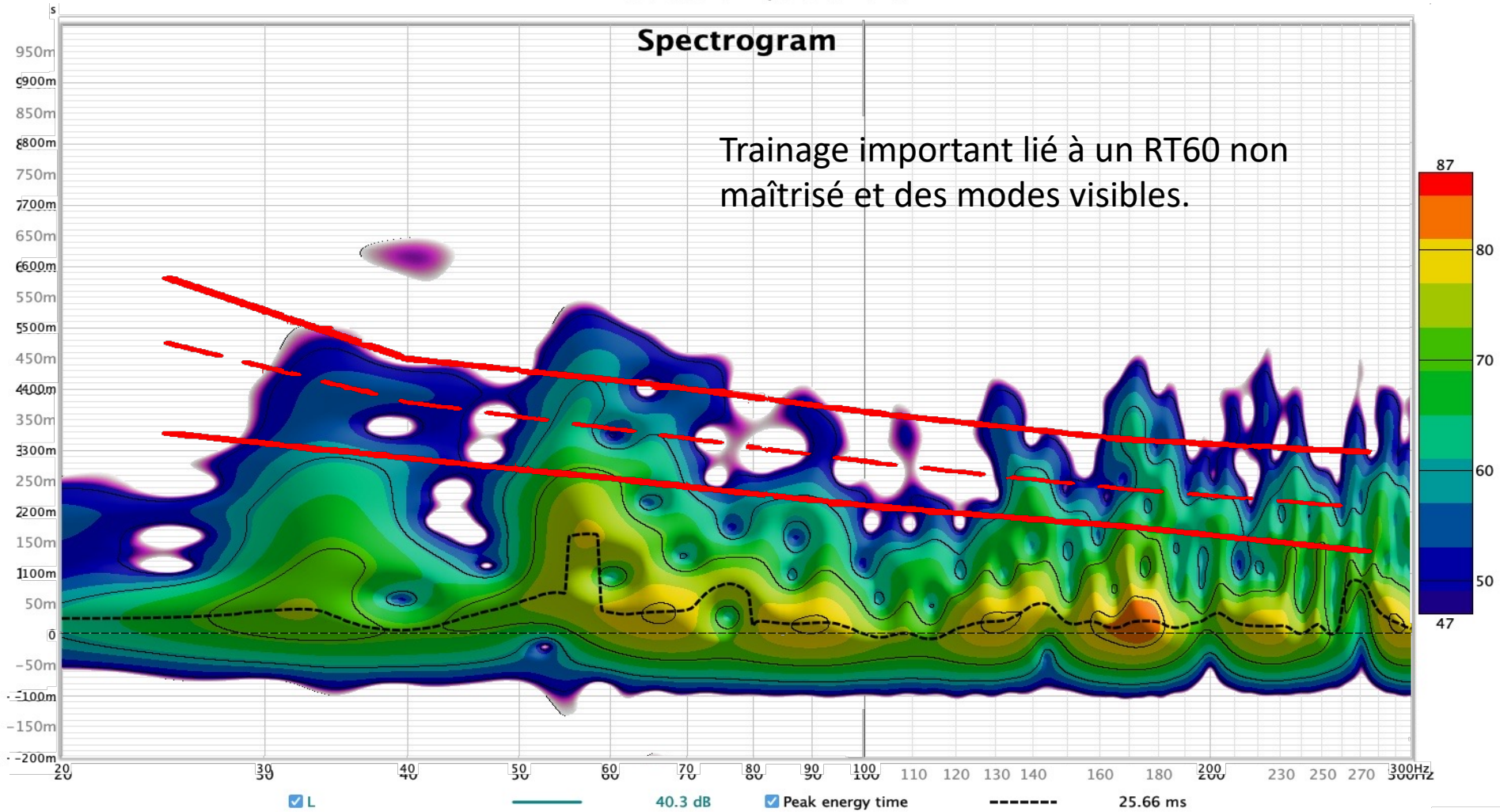
- Même constat à droite. Le trainage des modes est moins marqué car il y a de l'espace à droite, alors que l'enceinte gauche est près d'un coin de la pièce.

# Apertura Thema - Salon

Voie Gauche - Apertura Thema

## Spectrogram

Trainage important lié à un RT60 non maîtrisé et des modes visibles.

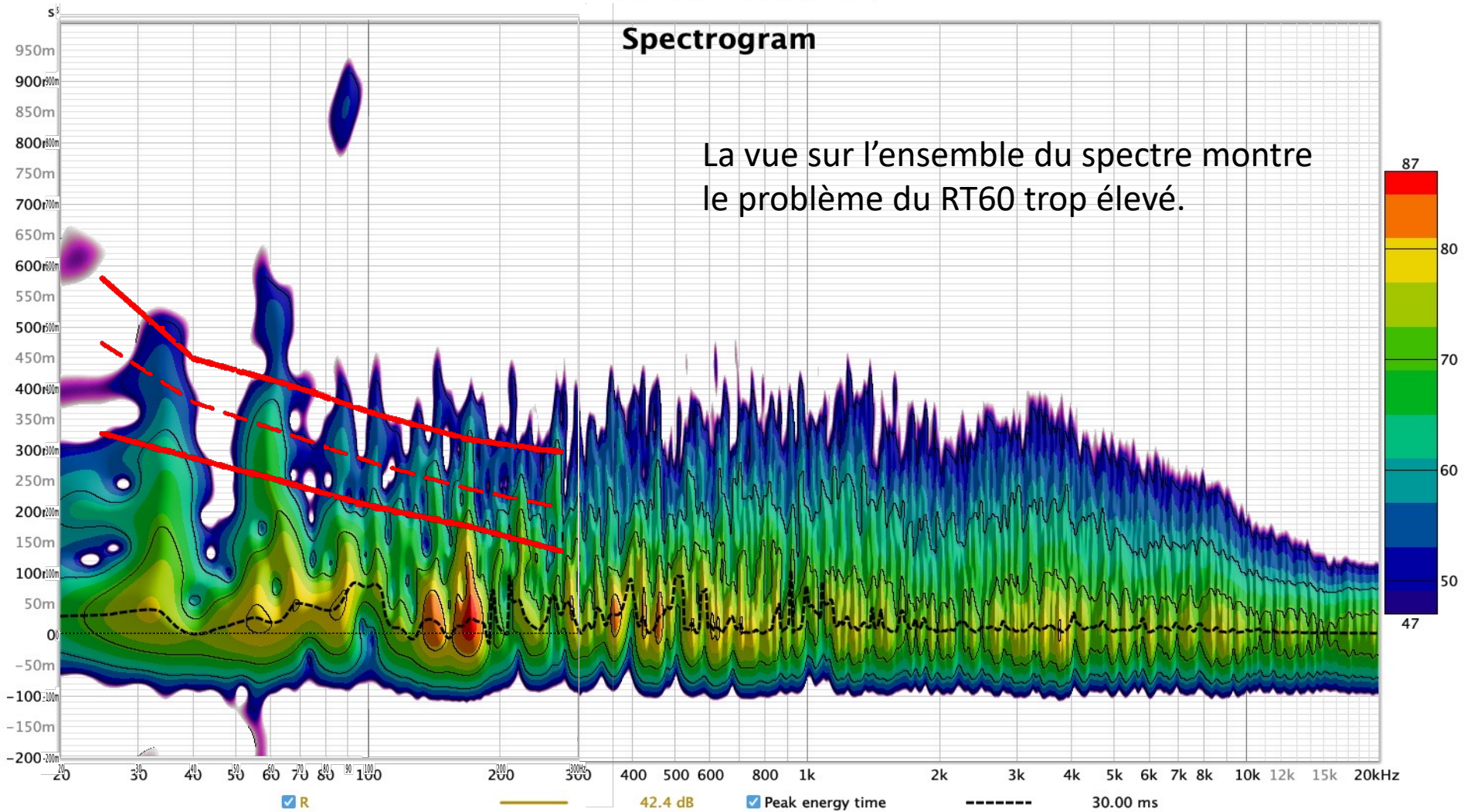


# Apertura Thema - Salon

Voie Droite - Apertura Thema

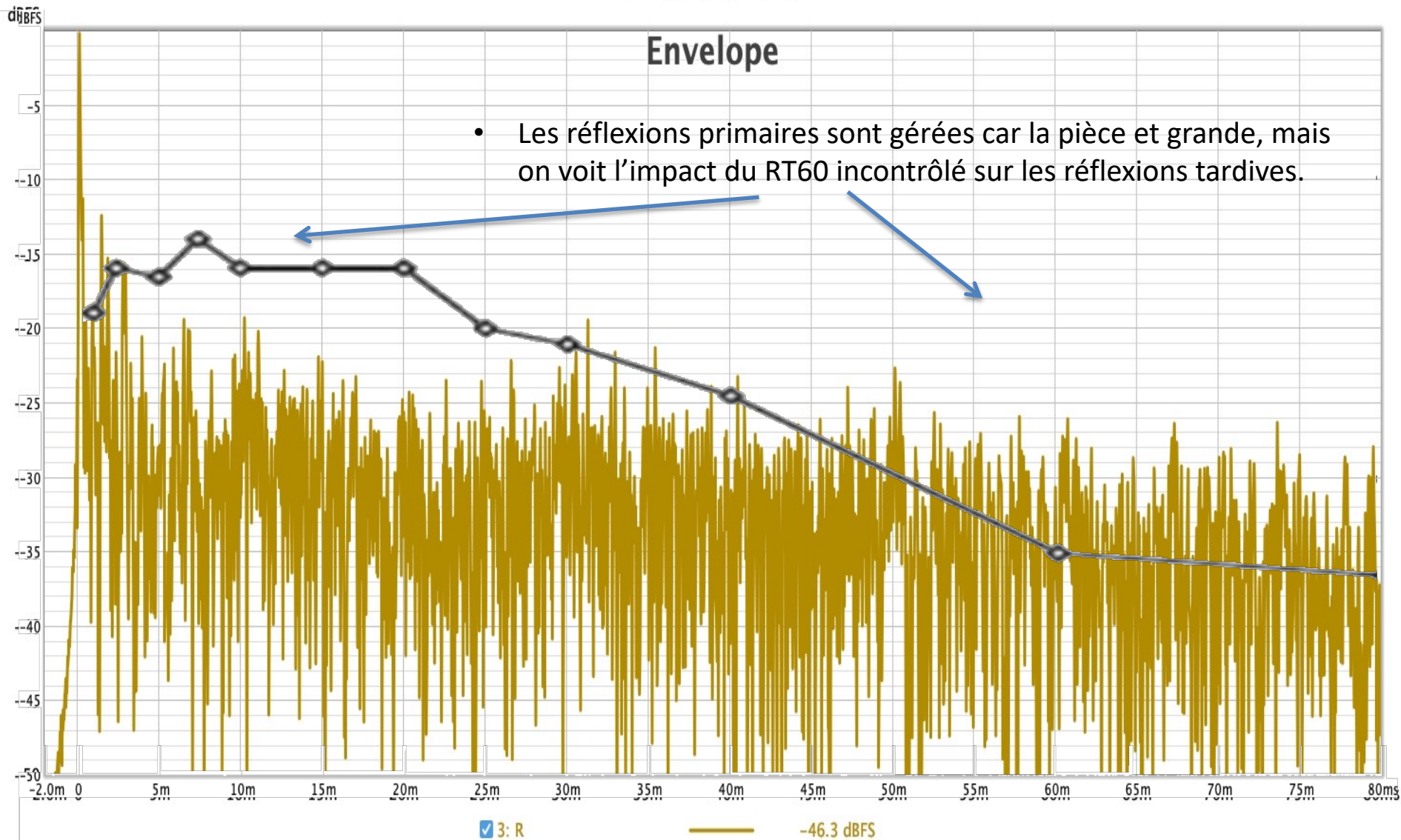
## Spectrogram

La vue sur l'ensemble du spectre montre le problème du RT60 trop élevé.



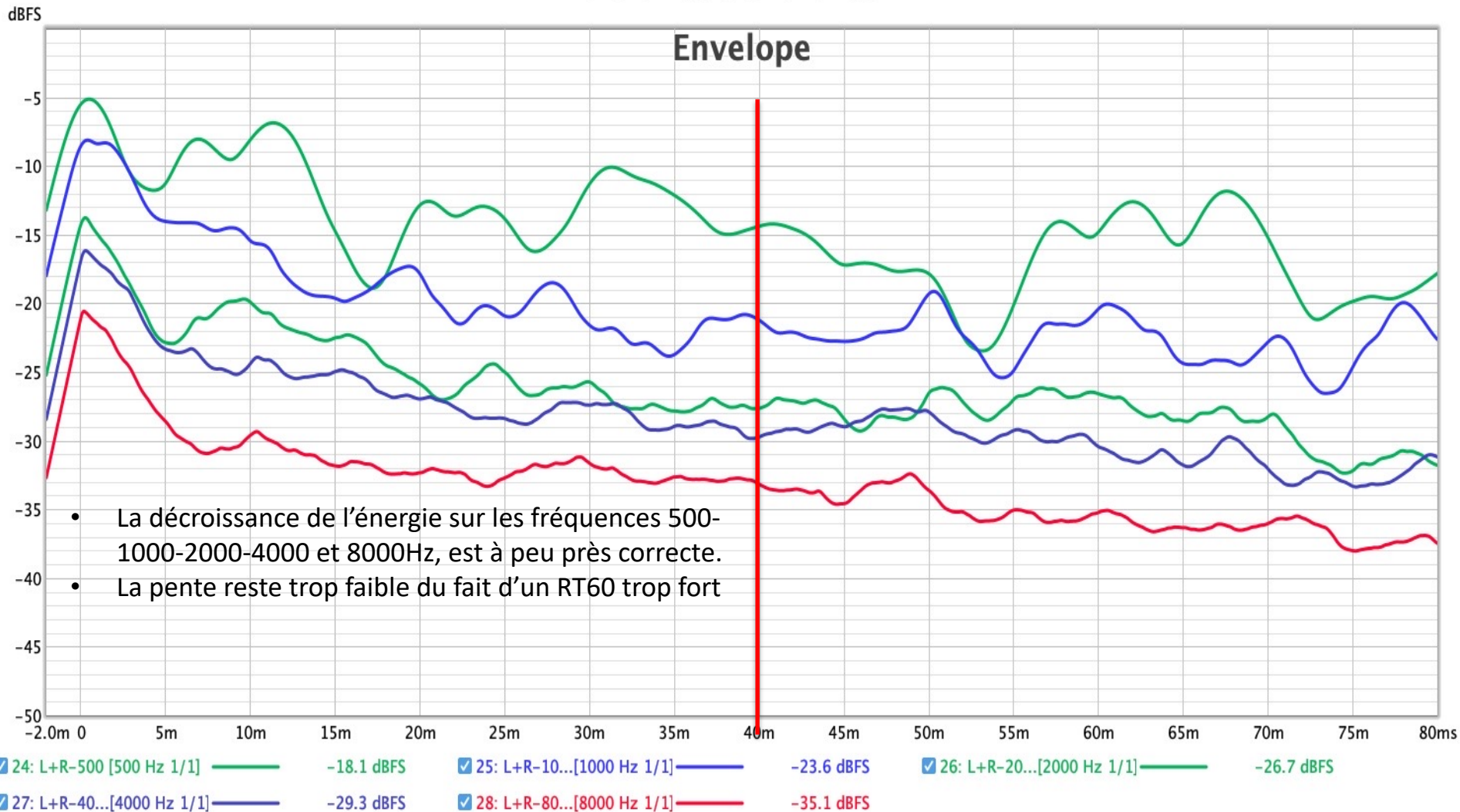
# Apertura Thema - Salon

ETC - Apertura Thema

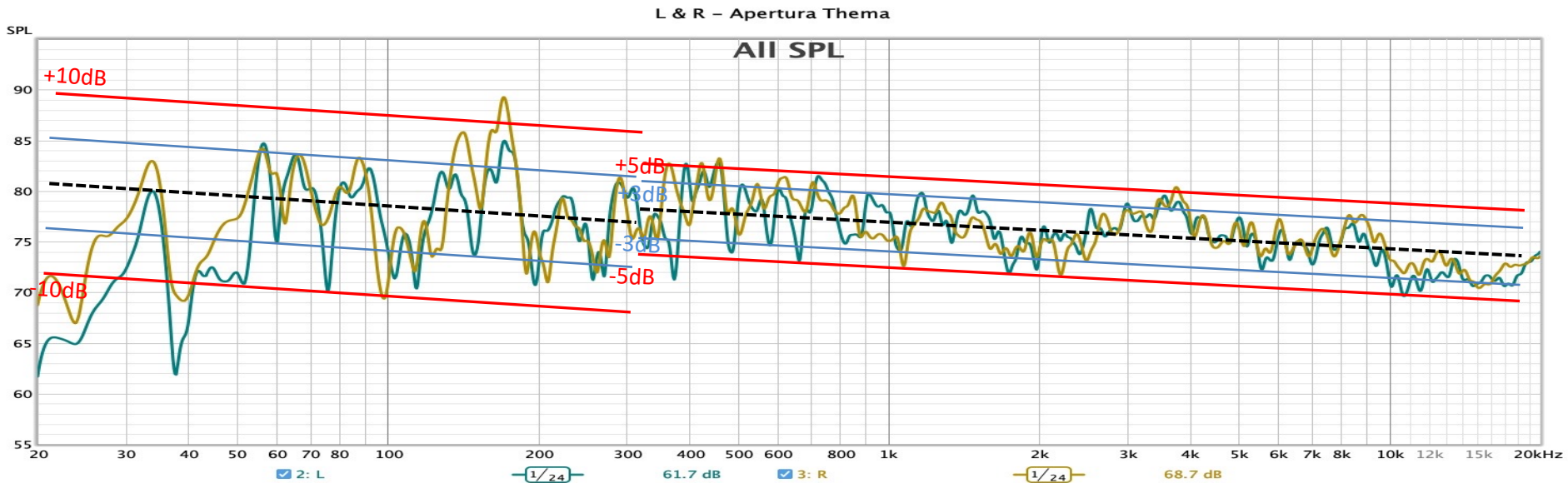
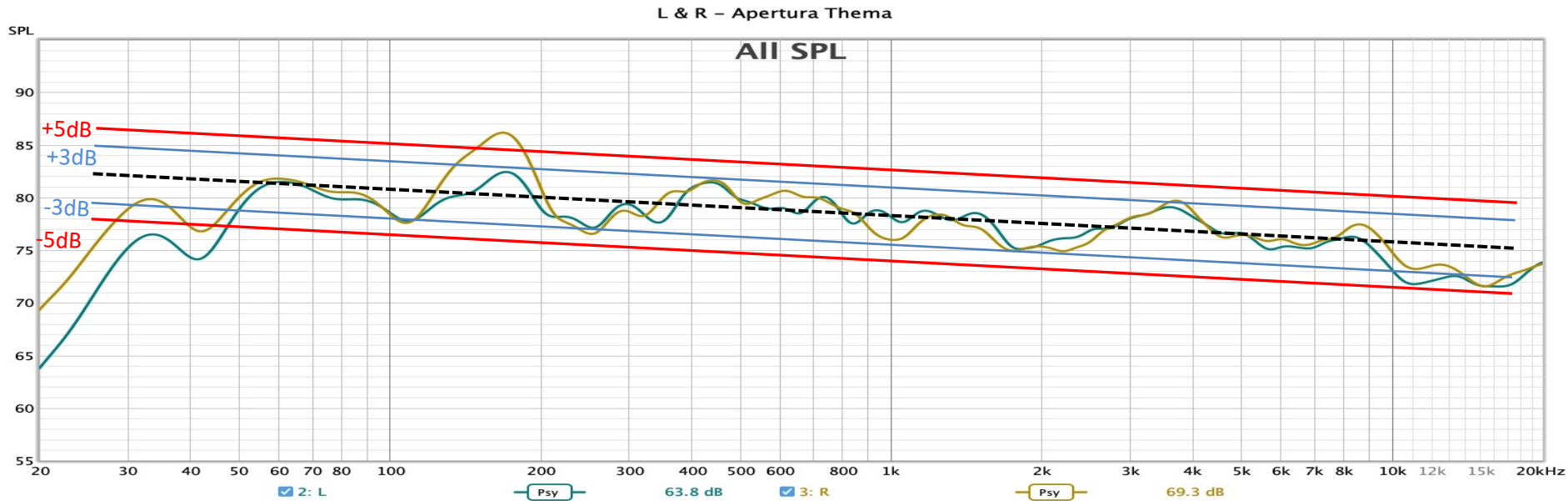


# Apertura Thema - Salon

ETC 40ms - Apertura Thema - Salon



# Apertura Thema - Salon



Ces mesures d'amplitude/fréquence sont correctes. Il y a quelques anomalies entre voie gauche et droite, mais rien de très catastrophique.

