



**OFFRE CSTB N°26083158**

**EVALUATION METROLOGIQUE DU  
RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE  
ET DE LA MODULATION TEMPORELLE  
DE CASQUES DE REALITE VIRTUELLE  
ET DE SMARTPHONES**

**Rapport final**

Auteur(s)	Approbation	Vérification
■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

**Centre Scientifique et Technique du Bâtiment**

24 Rue Joseph Fourier - 38400 SAINT-MARTIN-D'HERES

Tél. : +33 (0)4 76 76 25 25 – [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

---

## SOMMAIRE

---

<b>1 - OBJET DE L'ETUDE.....</b>	<b>3</b>
<b>2 - LISTE DES CASQUES, SMARTPHONES ET CONFIGURATIONS TESTES ...</b>	<b>4</b>
2.1 - CHOIX DES CASQUES .....	4
2.2 - CHOIX DES SMARTPHONES POUR LES MESURES COMPLEMENTAIRES.....	6
2.3 - CONFIGURATION D'ESSAIS.....	7
2.3.1 - Contenu utilisé pour la caractérisation de la modulation temporelle .....	8
2.3.2 - Contenu utilisé pour les mesures de champs électromagnétiques rayonnés ....	9
2.4 - MATERIEL UTILISE POUR LES ESSAIS .....	10
<b>3 - CARACTERISATION DE LA MODULATION TEMPORELLE.....</b>	<b>11</b>
3.1 - PROTOCOLE D'ESSAI .....	11
3.2 - RESULTATS DES ESSAIS DE MODULATION .....	13
3.3 - SYNTHESE DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION DE LA MODULATION TEMPORELLE .....	32
<b>4 - EVALUATION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES.....</b>	<b>35</b>
4.1 - METHODOLOGIE RETENUE.....	35
4.2 - MISE AU POINT DE L'ESSAI DE CARACTERISATION DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE .....	36
4.3 - BANC D'ESSAI.....	38
4.4 - BANDES DE FREQUENCES DE MESURE .....	40
4.5 - PROTOCOLE D'ESSAI .....	41
4.5.1 - Déroulement d'un essai .....	41
4.5.2 - Résultats des essais .....	42
4.6 - RESULTATS DES MESURES DE NIVEAUX DE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES .....	43
4.7 - RESULTATS D'ANALYSES SPECTRALES .....	52
4.7.1 - Exemple de spectres dans les bandes de fréquences impactées .....	52
4.7.2 - Exemple de spectres dans les bandes de fréquences non impactées .....	55
4.8 - SYNTHESE DES MESURES DE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES .....	56
<b>5 - CONCLUSIONS.....</b>	<b>57</b>

---

## 1 - OBJET DE L'ETUDE

---

L'ANSES mène une expertise collective sur les effets sanitaires potentiels liés à une exposition aux technologies de réalité virtuelle (RV) et de réalité augmentée (RA). Dans le cadre de ces travaux, l'ANSES a souhaité faire évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques et à caractériser la modulation temporelle lumineuse générées par le port de casques de réalité virtuelle.

Il s'agit donc dans cette étude d'une part de caractériser la modulation temporelle (fréquences, taux) due aux LED intégrées dans les différentes technologies (LED, OLED, etc.). Suite à la présentation au groupe de travail de l'Anses des résultats des essais de caractérisation de la modulation temporelle sur l'échantillon de casques, il a été décidé par l'Anses et le CSTB de réaliser des mesures complémentaires sur un casque RV/RA (avec des séquences d'images non stationnaires et non uniformes) et sur des Smartphones pouvant être utilisés dans un casque.

Et il s'agit d'autre part d'évaluer l'exposition de la tête de l'utilisateur aux champs électromagnétiques générés par les émetteurs radiofréquences (Wifi, Bluetooth, 4G, 5G, etc.) et les perturbations électromagnétiques générées potentiellement par les circuits, capteurs et équipements électroniques intégrés dans le casque.

Ce rapport présente l'ensemble des résultats des mesures réalisées sur un échantillon de casques de réalité virtuelle.

## 2 - LISTE DES CASQUES, SMARTPHONES ET CONFIGURATIONS TESTES

### 2.1 - Choix des casques

La sélection des casques de réalité virtuelle à mesurer a été réalisée par le CSTB et le laboratoire LMC2 de l'université Descartes, en fonction des casques disponibles au sein du laboratoire et des critères de représentativité des modèles choisis. Il s'agissait d'avoir des casques filaires et non filaires, des modèles anciens et plus récents, des capteurs intégrés dans le casque ou des capteurs externes, etc. Ainsi neuf casques de réalité virtuelle ont été sélectionnés : huit casques appartenant au LMC2 et un casque autonome qui a été acheté par le CSTB pour compléter la sélection.

La liste des casques retenus, avec quelques informations techniques respectives (données du fabricant) est la suivante :

#### Casque #1 :

Définition : 1080 x 1200 pixels

Champ de vision : 110°

Fréquence d'affichage : 90 Hz

Masse : 600 g

Caméra extérieure + deux manettes



#### Casque #2 :

Second exemplaire du modèle précédent



#### Casque #3 :

Résolution : 2560 x 1440 pixels

Fréquence d'affichage : 80 Hz

Processeur : Intel i5-4590, AMD Ryzen 5 1500X

Ecran : LCD

Capteurs intégrés, caméra embarquée, 2 manettes

Masse : 563 g

Dimensions : 275 x 95 x 133 mm



**Casque #4 :**

Résolution Max : 2880 x 1600 pixels

Tracking : 360°

Angle de vision (horizontal) : 110°

Caméra extérieure, Accéléromètre, gyroscope

Eye tracking activé, 2 manettes

**Casque #5 :**

Résolution : 1920 x 1080 pixels

Écran : OLED

Tracker de position externe

Gyroscope 3 axes, accéléromètre, magnétomètre, caméra infrarouge

**Casque #6 :**

Résolution Max : 2880 x 1700 pixels

Dalle LCD Full RGB de 3.4 pouces

Tracking : 360°

Angle de vision (horizontal) : 110°

Caméra embarquée dans le casque, 6 capteurs

Accéléromètre, gyroscope

Pas de capteurs externes pour la triangulation

**Casque #7 :**

Résolution : 1920 x 1080 pixels micro-LEDs et deux 1440 x 1600 pixels AMOLEDs

Champ de vision : 87°

Contraste : 10,000:1

Masse : 605 g



**Casque #8 : avec module Wifi**

Définition : 1080 x 1200 pixels

Champ de vision : 110°

Fréquence d'affichage : 90 Hz

Masse : 600 g

Caméra extérieure + 2 manettes

**Casque #9 :**

Définition : 2560 x 1440 pixels

Champ de vision : 110°

Fréquence d'affichage : 72 Hz

Masse : 467 g

Dimensions : 190 x 105 x 115 mm



## 2.2 - Choix des Smartphones pour les mesures complémentaires

La sélection des Smartphones à mesurer a été réalisée par le CSTB, en accord avec l'Anses, en fonction des appareils accessibles et des systèmes d'exploitation utilisés. Sur le marché, on trouve principalement le système iOS d'Apple et Android de Google.

La liste des smartphones retenus, avec quelques informations techniques respectives (données du fabricant) est la suivante :

**Smartphone #1 :**

Définition : 1280 x 768 pixels

Ecran : 4.7 pouces, LCD

Version : Android 4.2 mis à jour en Android 8.1

Date de sortie : novembre 2012

Masse : 139 g

Dimensions : 68.7 x 133.9 x 9.1 mm

Niveau d'exposition (DAS) : 0.41



**Smartphone #2 :**

Définition : 1280 x 720 pixels  
Ecran : 4.7 pouces, OLED, 312 ppp  
Version : Android 5.1  
Date de sortie : janvier 2016  
Masse : 132 g  
Dimensions : 65.2 x 134.5 x 7.3 mm  
Niveau d'exposition (DAS) : 0.49

**Smartphone #3 :**

Définition : 1334 x 750 pixels  
Ecran : 4.7 pouces, LCD, 326 ppp  
Version : iOS 9 mis à jour en iOS 13.6  
Date de sortie : septembre 2015  
Masse : 143 g  
Dimensions : 67.1 x 138.3 x 7.1 mm  
Niveau d'exposition (DAS) : 0.87



## 2.3 - Configuration d'essais

Les casques #1 à #8 ont été mesurés au sein du laboratoire LMC2 de l'université Descartes à Boulogne Billancourt<sup>1</sup>. Un box de réalité virtuelle a été utilisé pour la caractérisation de la modulation temporelle et un second box pour les mesures de champs électromagnétiques rayonnés. L'ensemble du matériel (casques, ordinateur, logiciel, capteurs, modules wifi, etc.) a été fourni et paramétré par l'ingénieur responsable de la plateforme du LMC2.



Figure 1 : bancs d'essais dans le laboratoire LMC2 : caractérisation de la modulation temporelle (à gauche) et mesure des champ électromagnétiques rayonnés (à droite)

<sup>1</sup> LMC2, 71 avenue Edouard Vaillant, 92100 Boulogne Billancourt, France

Les deux campagnes de mesures ont été réalisées en parallèle sur deux journées consécutives : mardi 23 et mercredi 24 juin 2020.

Le casque #9 a été mesuré dans le laboratoire du CSTB à Saint Martin d'Hères le lundi 29 juin 2020.

Les mesures complémentaires (Smartphones) ont été réalisées dans le laboratoire du CSTB à Saint Martin d'Hères entre fin juillet à fin aout.

### **2.3.1 - Contenu utilisé pour la caractérisation de la modulation temporelle**

Pour la caractérisation de la modulation temporelle des casques #1 à #8, une scène entièrement blanche, générée via le logiciel Unity 3D, est envoyée dans le casque.

Pour le casque #9, les flux suivants sont utilisés : une montagne russe en dynamique (Coastiality, manège 'Dynamite'), une vidéo RV/RA avec Youtube VR et une simple image blanche sans moteur 3D.

Dans le cadre des mesures complémentaires sur les Smartphones, l'application FullDive VR est utilisée pour produire du contenu visuel 3D sur l'écran sous la forme de deux sous-images. Une image blanche sans moteur RV/RA est aussi utilisée pour ces mesures.



Figure 2 : menu virtuel de FullDive VR



Figure 3 : capture d'écran de la scène Coastiality utilisée pour le flux dynamique

### **2.3.2 - Contenu utilisé pour les mesures de champs électromagnétiques rayonnés**

Pour les mesures de champs électromagnétiques rayonnés, la scène de réalité virtuelle envoyée dans le casque est une modélisation de la gare RER Saint-Michel en 3D avec des textures et du son (scène réalisée dans le cadre d'un projet du LMC2 en collaboration avec le SNCF). Dans cette scène, plusieurs évènements se succèdent (avatars animés qui se déplacent, passage de train qui rentre en gare, etc.) et l'utilisateur peut se déplacer sur le quai. L'environnement est texturé avec des lumières en temps réel et précalculées.



*Figure 4 : capture d'écran de la scène de la gare Saint Michel (à gauche)  
et de montagne russe (à droite)*

Pour le casque #9 mesuré au CSTB, une scène de montagne russe a été utilisée comme contenu. Le casque étant autonome, la scène a été téléchargée dans le casque.

## 2.4 - Matériel utilisé pour les essais

Les équipements utilisés pour la caractérisation de la modulation temporelle et les mesures de champs électromagnétiques rayonnés sont donnés dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

Oscilloscope numérique	Teledyne Lecroy	WaveRunner 640 Zi	
Préamplificateur à gain variable	Gigahertz Optik	P-9202-04	
Photodétecteur (cellule de détection photopique)	Gigahertz Optik	PD-9310A-1	

Tableau 1 : équipements utilisés pour la caractérisation de modulation temporelle

Analyseur de spectre	Narda	SRM 3006	
Sonde de champ magnétique 9 kHz – 250 MHz	Narda	SRM-H-3581/02	
Sonde de champ électrique 420 MHz – 6 GHz	Narda	SRM-E-3502/01	

Tableau 2 : équipements utilisés pour la mesure de champs électromagnétiques rayonnés

---

## 3 - CARACTERISATION DE LA MODULATION TEMPORELLE

---

### 3.1 - Protocole d'essai

Les mesures de modulation temporelle de la lumière sont effectuées en envoyant une image blanche fixe dans les deux voies du casque (œil droit et œil gauche).

Cette modulation a été caractérisée en utilisant des images stationnaires et uniformes pour tous les casques. De plus, dans le cadre du complément d'étude, on réalise sur le casque #9, une mesure avec un flux vidéo en situation réelle. L'objectif est de vérifier si la modulation temporelle est toujours présente pour des images non stationnaires et non uniformes.

Sur les Smartphones, une application de VR/RA est utilisée pour avoir un flux sous moteur graphique. Pour l'image blanche, l'opérateur affiche simplement une image blanche sans moteur de rendu. Le but ici est de vérifier si la modulation temporelle est liée à l'écran et/ou au logiciel graphique de rendu VR/RA.

Un photodétecteur est placé dans le casque de réalité virtuelle de façon à capter le signal lumineux provenant de l'écran (éclairage vertical dans le plan de l'œil). En fonction de la configuration, une mesure pour l'œil droit, l'œil gauche ou les deux yeux sont réalisées. Si besoin, le capteur de présence du casque est masqué afin d'éviter une mise en veille. Certains casques doivent fonctionner en présence de lumière ambiante, ce qui peut être gênant pour les mesures. Dans ce cas présent, la porte du box de mesure est simplement ouverte afin de laisser passer la lumière provenant du couloir. Le photodétecteur est relativement protégé de la lumière parasite et la luminosité des casques est relativement importante.

Le photodétecteur est connecté à un préamplificateur, lui-même connecté à un oscilloscope de précision. Le signal délivré en fonction du temps est enregistré afin de fournir la forme d'onde temporelle de la lumière émise. La forme d'onde est analysée par transformée de Fourier pour déterminer les composantes fréquentielles (typiquement des harmoniques de la fréquence dominante) et les amplitudes de ces composantes. Un calcul numérique permet de déterminer les différents indices de modulation temporelle :

- La fréquence de modulation dominante (Hz)
- Le rapport cyclique : durée d'éclairage de l'écran pendant une période, divisée par la durée de la période.
- Le taux de modulation (amplitude de modulation), désigné par le paramètre mod%, exprimé en %
- L'indice de papillotement de l'IESNA, appelé FI (flicker index) et exprimé en %
- L'indice Pst-Im de l'IEC caractérisant le papillotement (flicker) perceptible en situation

statique. Cet indice a été introduit dans les normes pour caractériser des lampes et des luminaires. Lorsqu'il est supérieur à 1, l'observateur moyen a plus de 50% de chance de percevoir le papillotement de la source de lumière en situation statique. Cet indice n'a pas été défini pour des écrans ou des afficheurs. Cependant, il est donné dans ce rapport à titre indicatif pour quantifier la visibilité des phénomènes de papillotement associés à la modulation temporelle de la lumière des écrans.

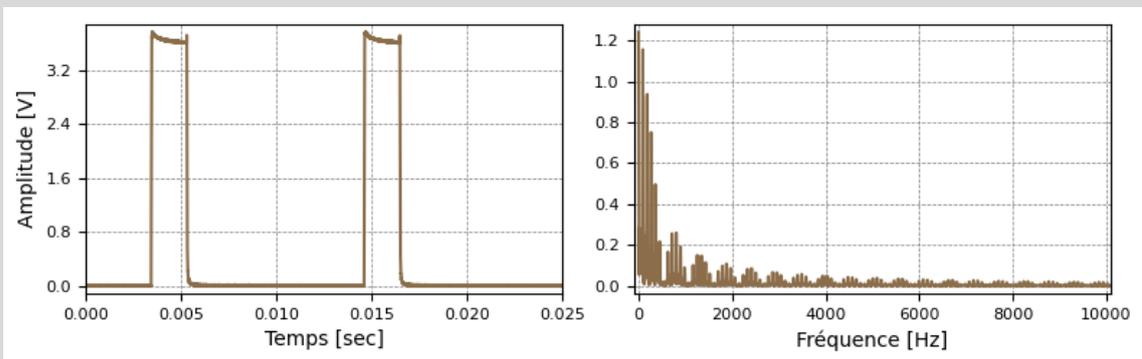
- L'indice SVM de l'IEC caractérisant la visibilité des effets stroboscopiques apparaissant lors des mouvements du corps (typiquement des mains) sous un éclairage comportant une modulation temporelle. Lorsqu'il est supérieur à 1, l'observateur moyen a plus de 50% de chance de percevoir des effets stroboscopiques. Cet indice n'a pas été défini pour des écrans ou des afficheurs. Cependant, il est donné dans ce rapport à titre indicatif pour quantifier la visibilité de phénomènes stroboscopiques associés à la modulation temporelle de la lumière des écrans.

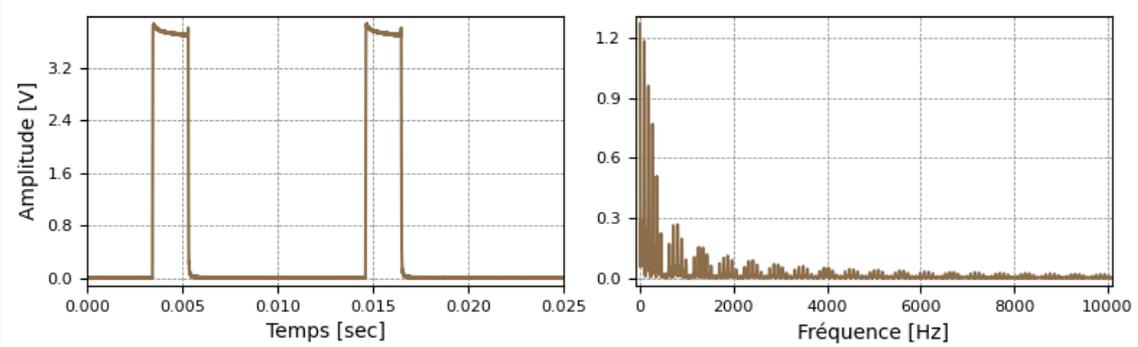
Les normes utilisées pour les mesures et les calculs sont les suivantes :

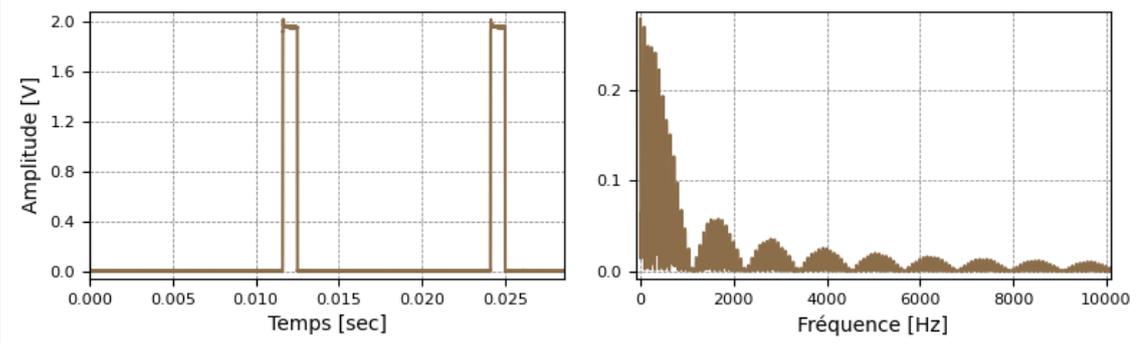
- Norme IEEE Power Electronics Society "IEEE recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers", IEEE 1789-2015, New York, NY: Institute for Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). 2015.
- Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Visual aspects of time-modulated lighting systems – Definitions and measurement models. TN 006-2016 Vienna, Austria.
- International Electrotechnical Commission (IEC). Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements - Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method. IEC TR 61547-1:2017 Geneva, Switzerland.
- International Electrotechnical Commission (IEC). Equipment for general lighting purposes - Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment. IEC TR 63158:2018, Geneva, Switzerland.
- National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Lighting Systems Division. Standard for temporal light artifacts: Test methods and guidance for acceptance criteria. NEMA 77-2017, Rosslyn, VA.

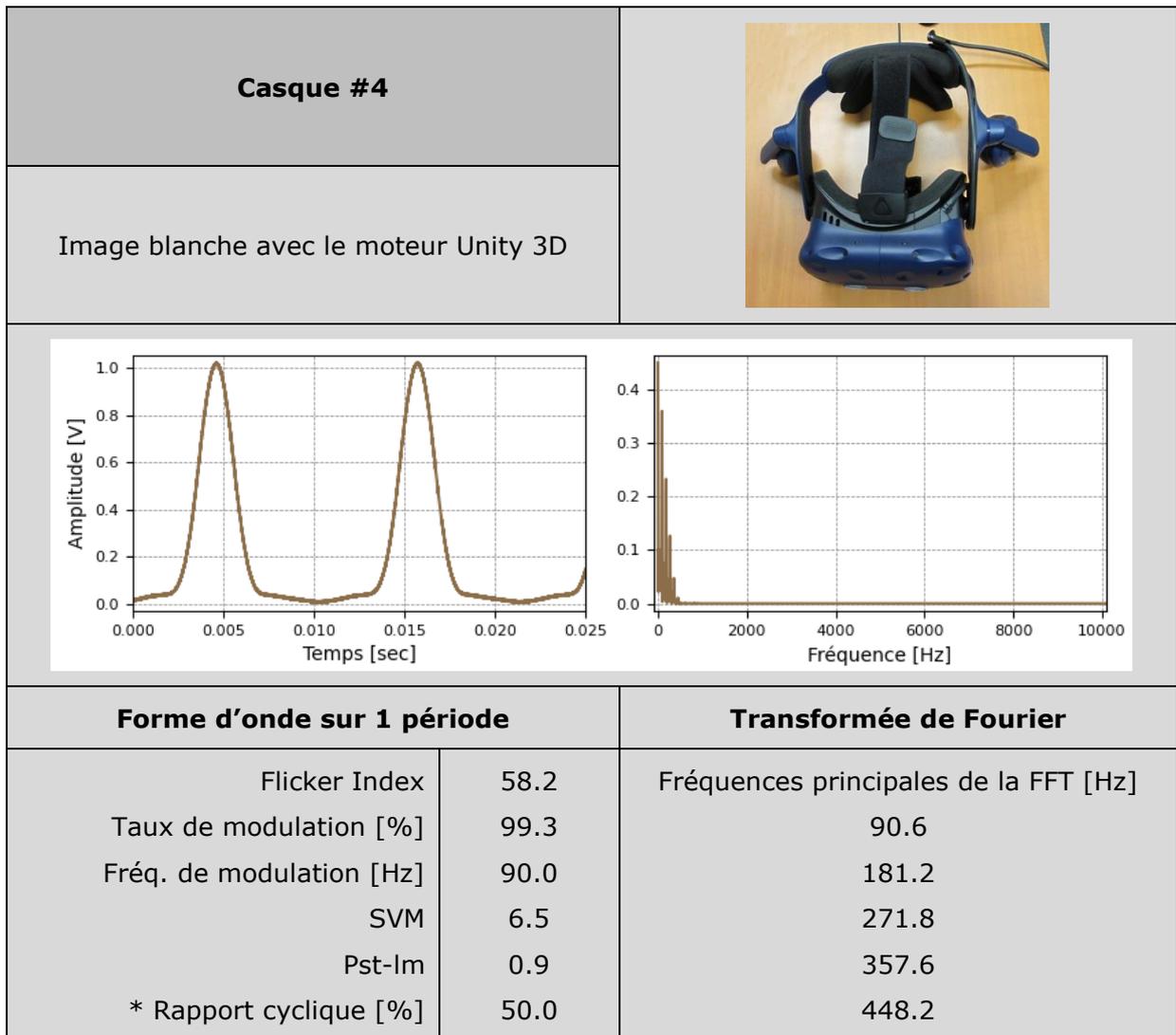
Une analyse est faite à partir de ces indices de manière à évaluer les impacts visuels, non-visuels et sanitaires associés à la modulation temporelle.

### 3.2 - Résultats des essais de modulation

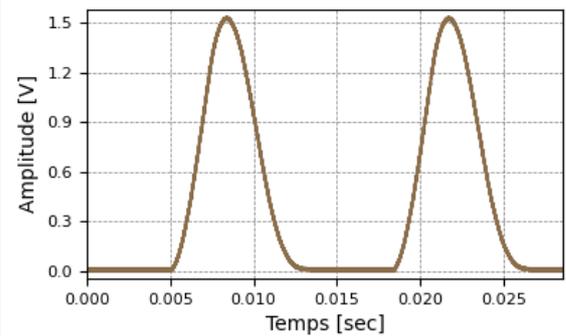
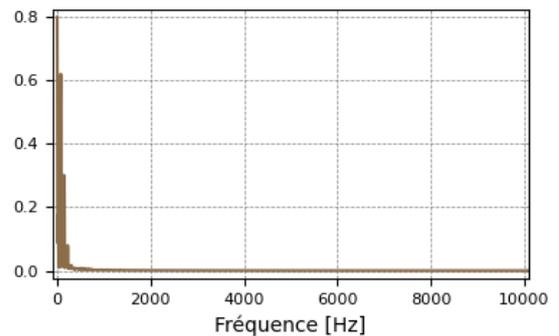
<b>Casque #1</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	82.2	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	90.6
Fréq. de modulation [Hz]	89.5	181.2
SVM	7.9	267.0
Pst-Im	12.7	357.6
Rapport cyclique [%]	16.6	448.2

<b>Casque #2</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	82.4	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	90.6
Fréq. de modulation [Hz]	89.5	181.2
SVM	8.0	267.0
Pst-Im	12.8	357.6
Rapport cyclique [%]	16.6	448.2

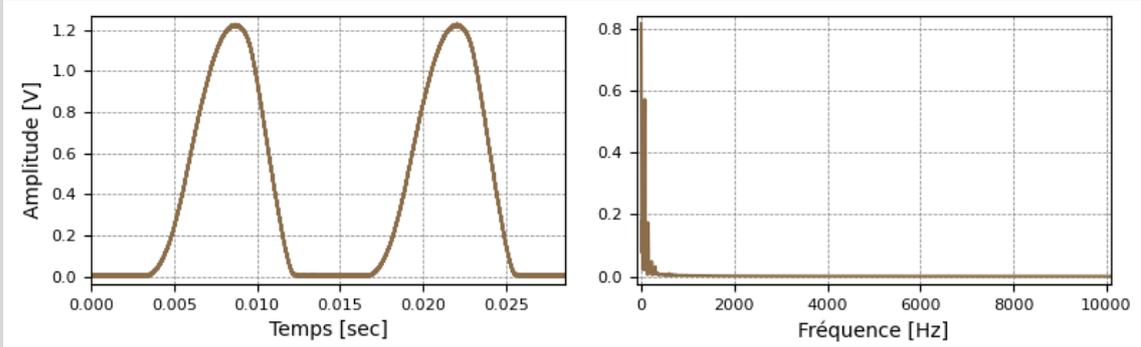
<b>Casque #3</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	92.4	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	81.1
Fréq. de modulation [Hz]	80.0	162.1
SVM	8.6	238.4
Pst-Im	8.0	319.5
Rapport cyclique [%]	7.0	400.5



\* Le signal n'étant pas carré, le rapport cyclique est obtenu dès lors que l'on a du signal lumineux.

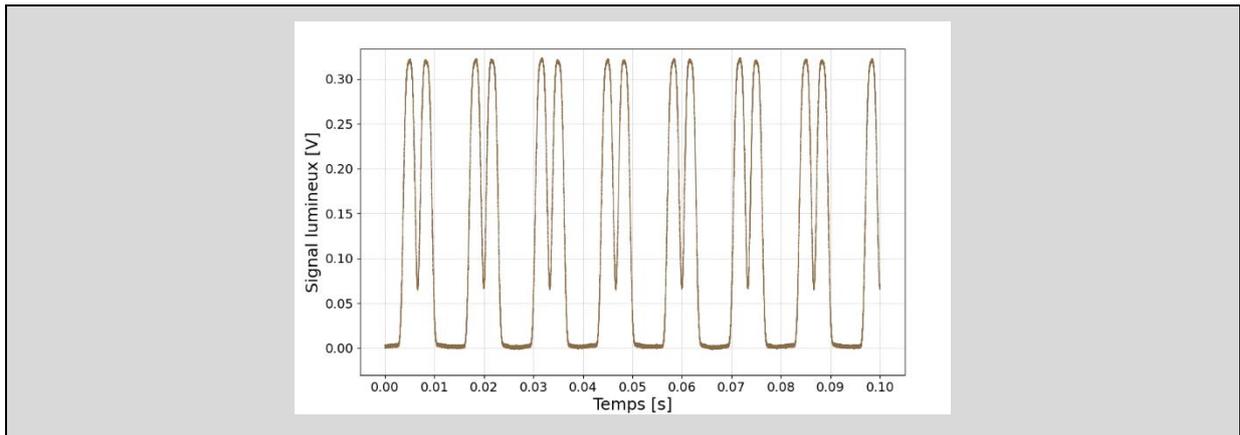
<b>Casque #5</b> <b>Résultat pour l'œil droit</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	57.2	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	76.3
Fréq. de modulation [Hz]	75.0	147.8
SVM	6.5	224.1
Pst-Im	1.2	305.2
* Rapport cyclique [%]	60.0	381.5

\* Le signal n'étant pas carré, la durée d'allumage utilisée pour le calcul du rapport cyclique est définie par un éclairage mesuré non-nul.

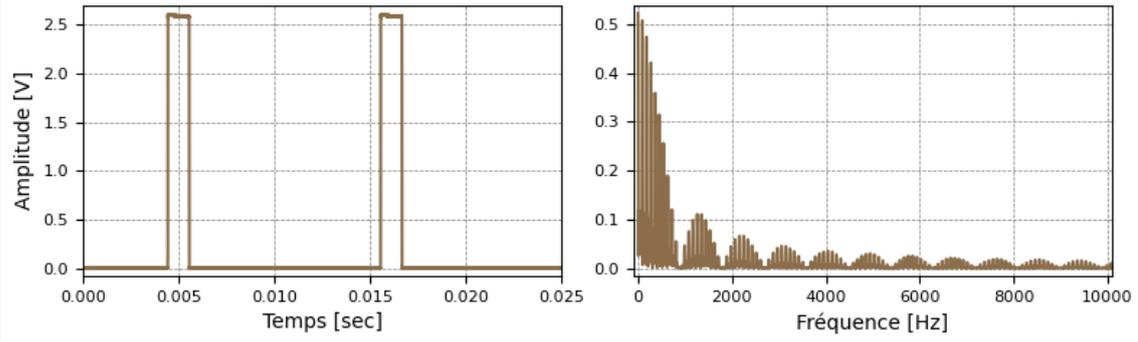
<p><b>Casque #5</b> <b>Résultat pour l'œil gauche</b></p>		
<p>Image blanche avec le moteur Unity 3D</p>		
		
<p><b>Forme d'onde sur 1 période</b></p>		<p><b>Transformée de Fourier</b></p>
Flicker Index	50.2	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	76.3
Fréq. de modulation [Hz]	75.0	147.8
SVM	5.9	224.1
Pst-Im	1.2	300.4
* Rapport cyclique [%]	60.0	367.2

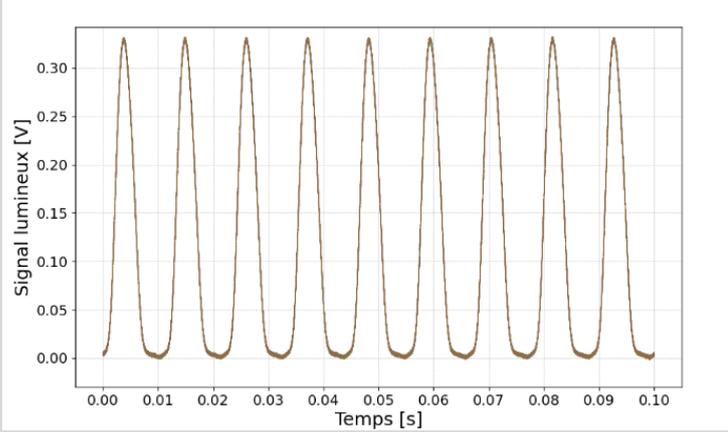
\* Le signal n'étant pas carré, la durée d'allumage utilisée pour le calcul du rapport cyclique est définie par un éclairement mesuré non-nul.

Une particularité du casque #5 est que les signaux lumineux reçus sur l'œil droit et sur l'œil gauche ne sont pas synchrones. Ils présentent un déphasage. La forme d'onde suivante (Figure 5) a été obtenue en plaçant le photodétecteur entre les deux yeux du casque. On visualise ainsi la superposition des deux signaux et on constate ces signaux lumineux reçus par l'œil gauche par l'œil droit ne sont pas synchrones et présentent un déphasage de 45°.



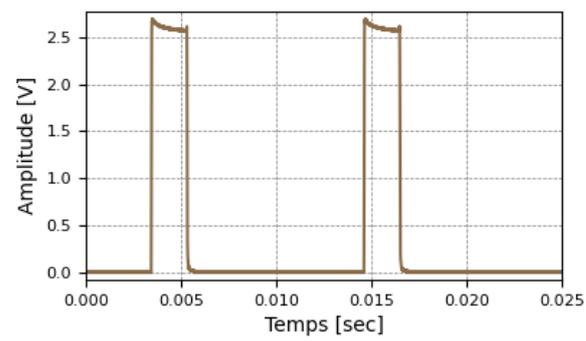
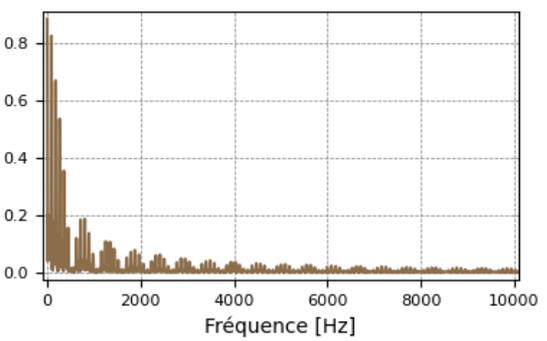
*Figure 5 : casque #5 - forme d'onde obtenue en plaçant le photodétecteur entre les deux yeux du casque*

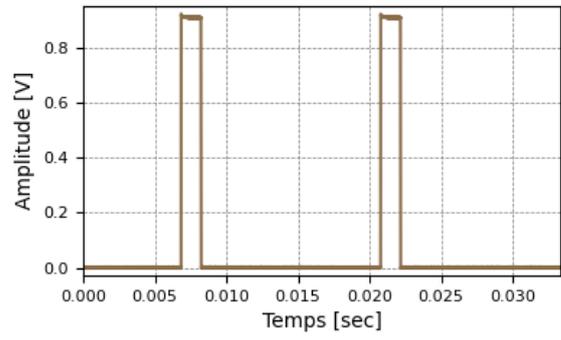
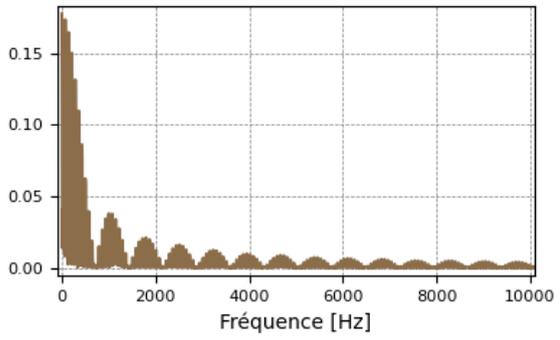
<b>Casque #6</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	89.3	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	90.6
Fréq. de modulation [Hz]	90.0	181.2
SVM	8.5	271.8
Pst-Im	10.8	357.6
Rapport cyclique [%]	10.0	448.2

<b>Casque #7</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	50.2	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	90.6
Fréq. de modulation [Hz]	90.0	181.2
SVM	5.9	267.0
** Pst-Im	n/c	357.6
* Rapport cyclique [%]	100.0	538.8

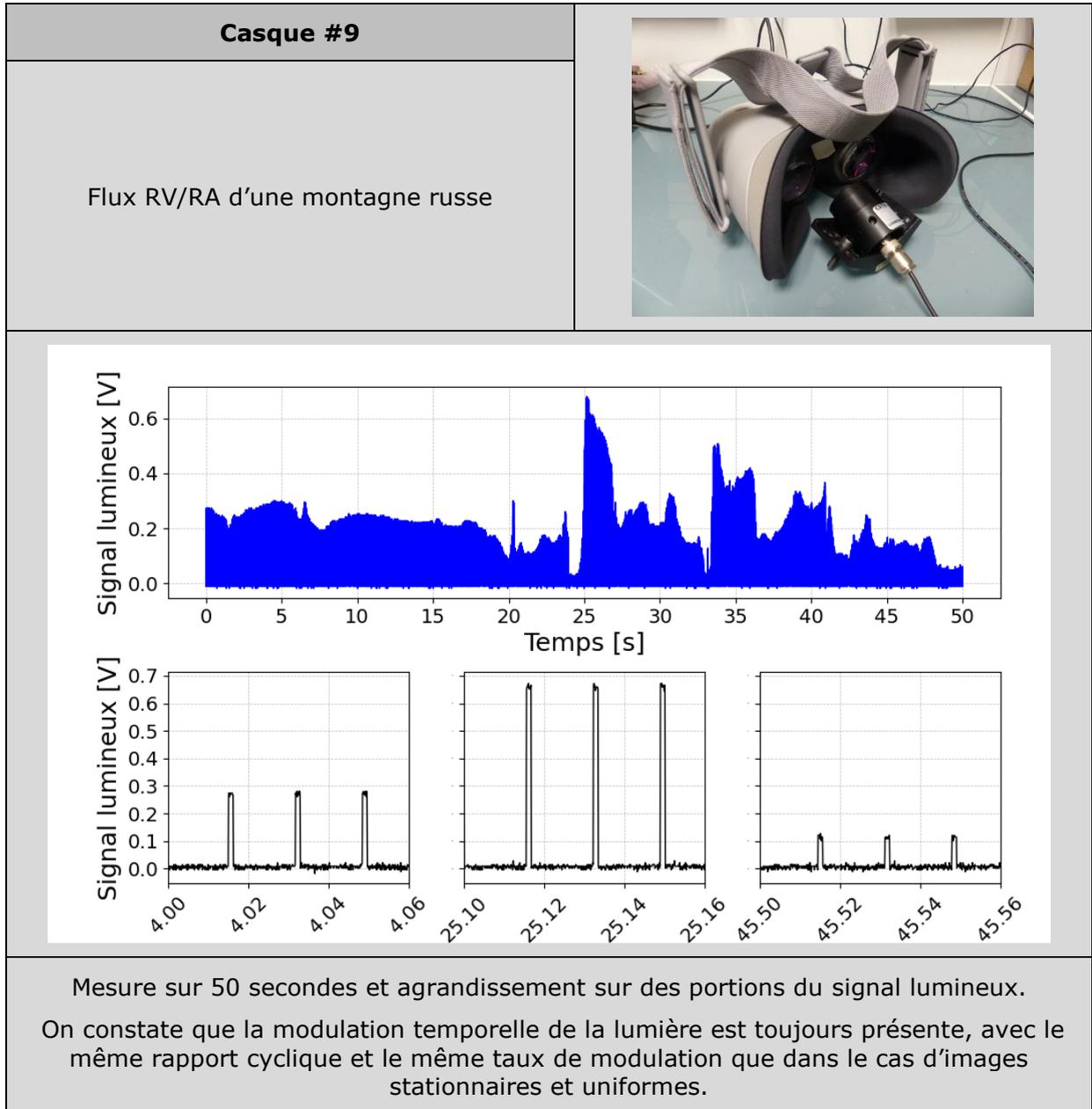
\* Le signal n'étant pas carré, la durée d'allumage utilisée pour le calcul du rapport cyclique est définie par un éclairement mesuré non-nul.

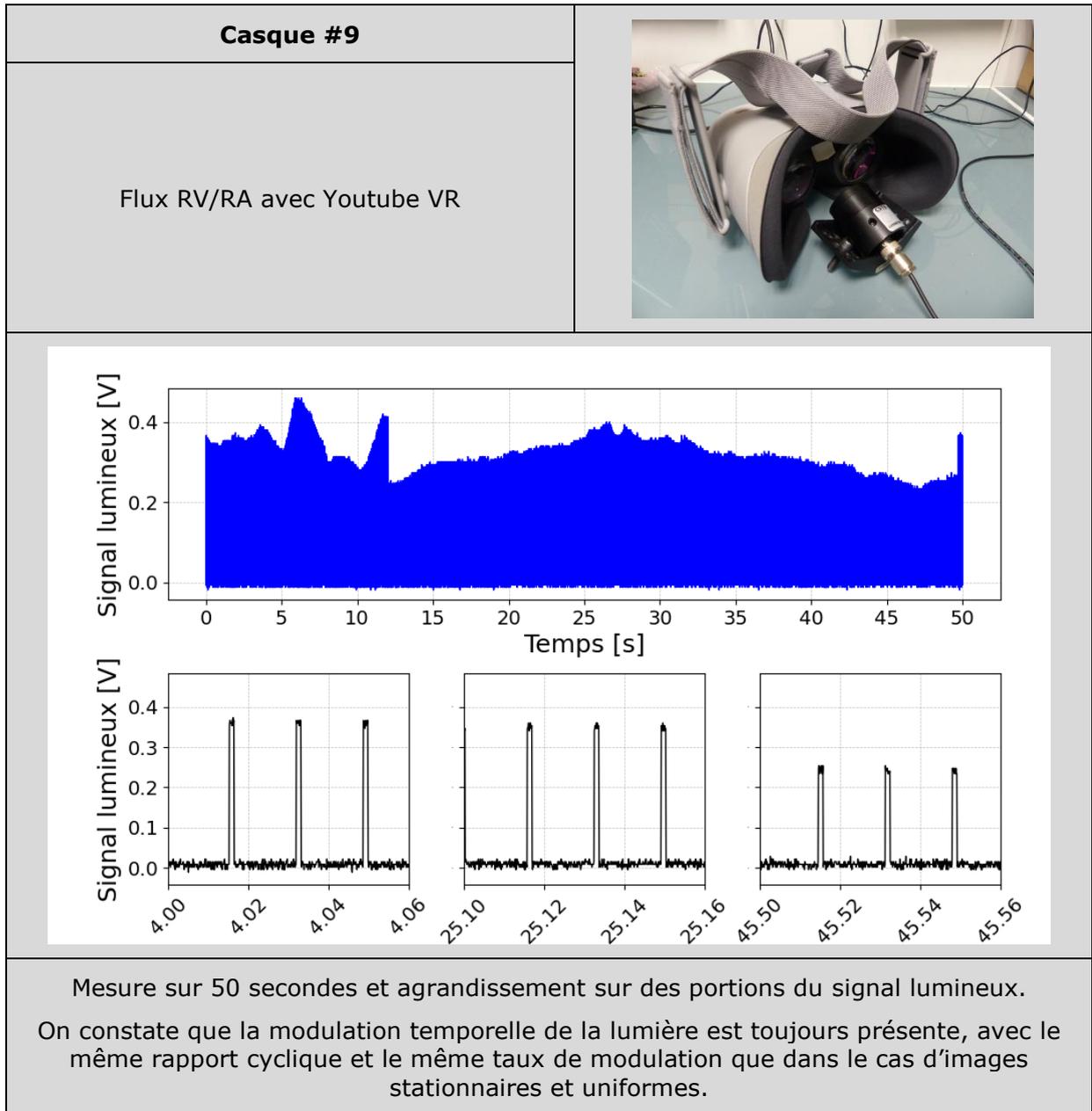
\*\* Le Pst-Im n'a pas pu être calculé en raison d'une mise en veille du casque trop rapide pour obtenir un enregistrement assez long des signaux lumineux.

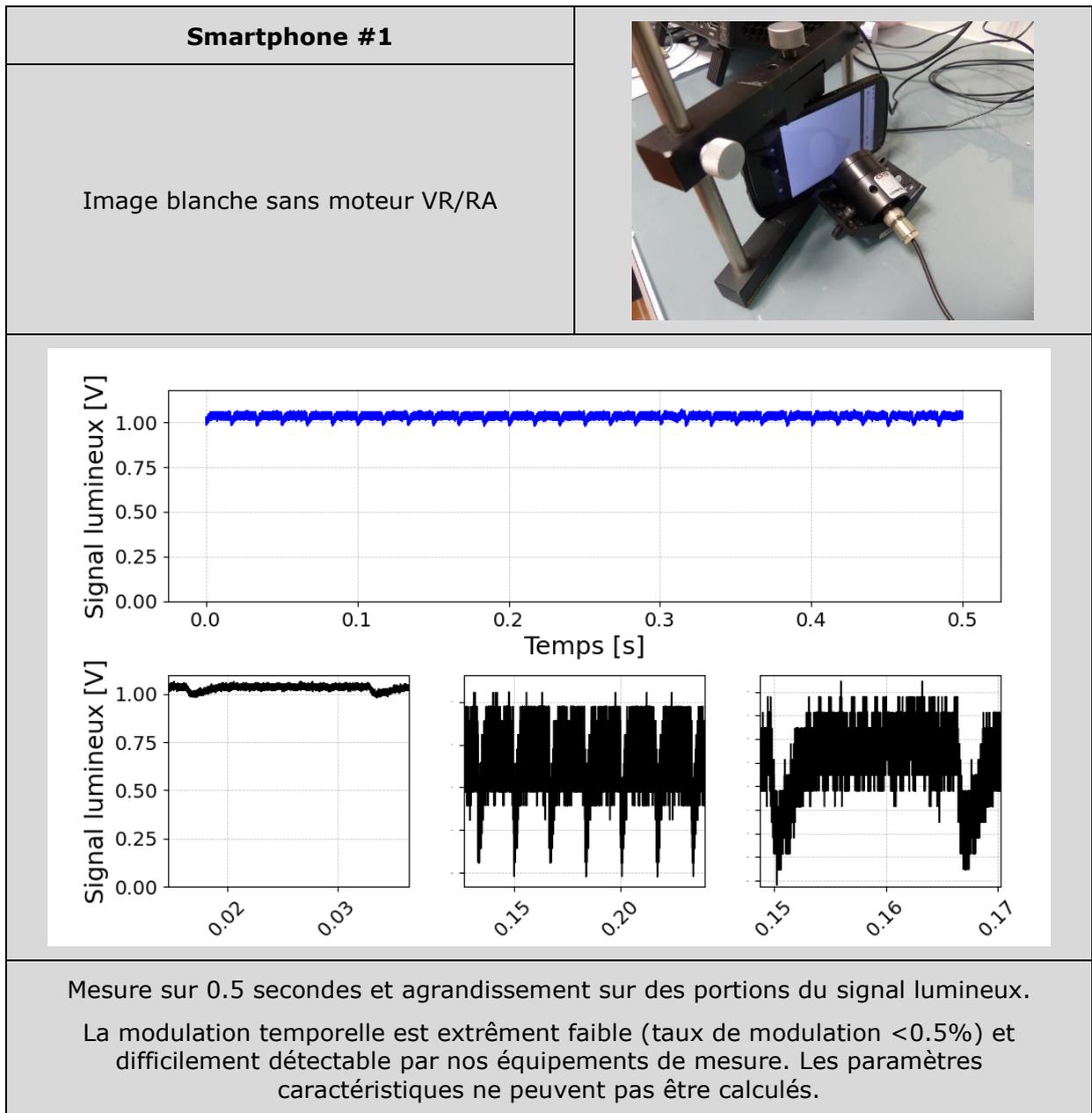
<b>Casque #8</b>		
Image blanche avec le moteur Unity 3D		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
Flicker Index	82.5	Fréquences principales de la FFT [Hz]
Taux de modulation [%]	100.0	90.6
Fréq.de modulation [Hz]	89.5	181.2
SVM	8.0	267.0
Pst-Im	12.7	357.6
Rapport cyclique [%]	16.7	448.2

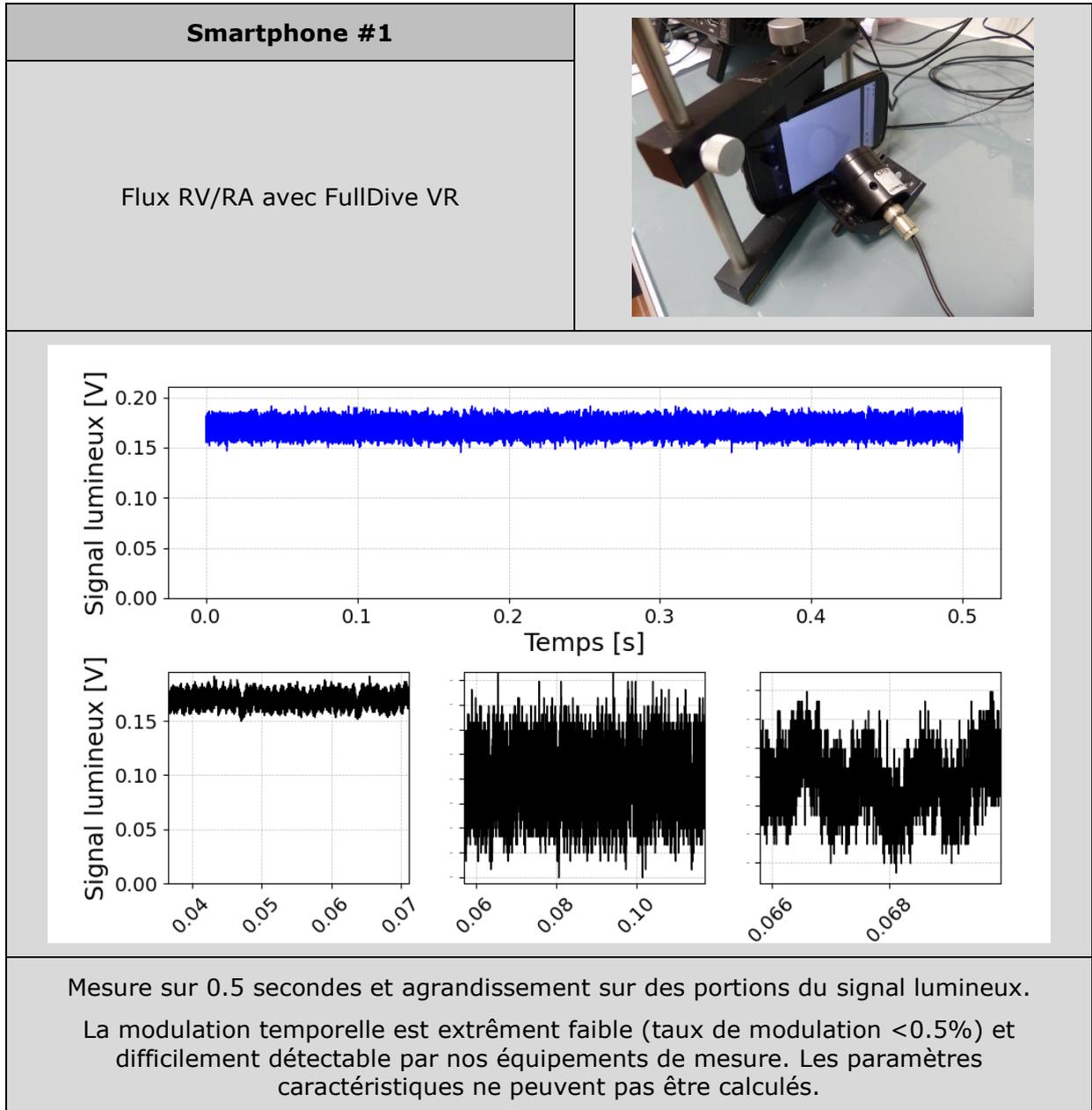
<b>Casque #9</b>		
Image blanche sans moteur VR/RA		
		
<b>Forme d'onde sur 1 période</b>		<b>Transformée de Fourier</b>
<p>Flicker Index</p> <p>Taux de modulation [%]</p> <p>Fréq. de modulation [Hz]</p> <p>SVM</p> <p>Pst-lm</p> <p>Rapport cyclique [%]</p>	<p>89.8</p> <p>100.0</p> <p>71.8</p> <p>9.0</p> <p>9.2</p> <p>9.9</p>	<p>Fréquences principales de la FFT [Hz]</p> <p>71.5</p> <p>143.0</p> <p>214.6</p> <p>286.1</p> <p>357.6</p>

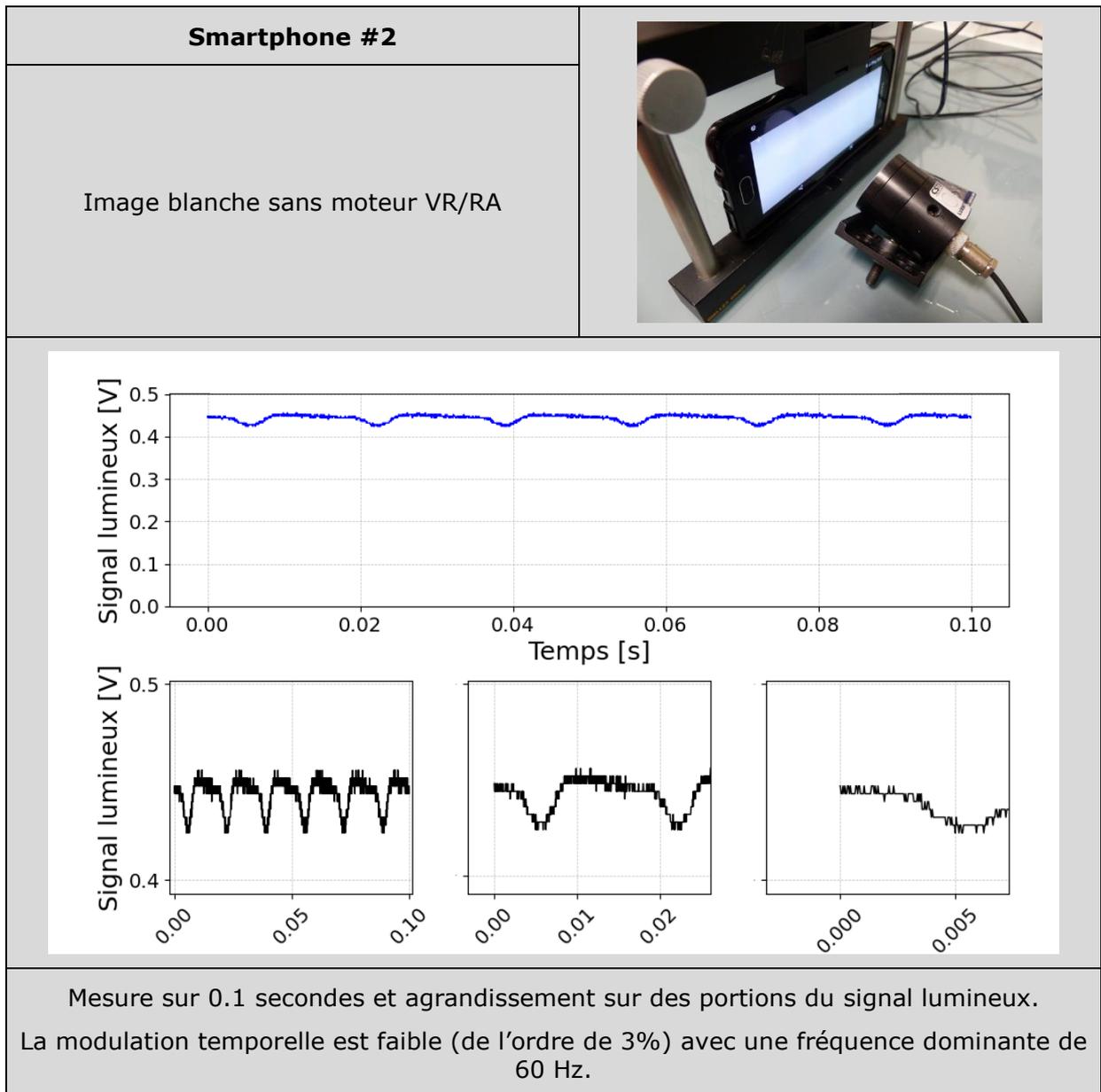
Mesures complémentaires

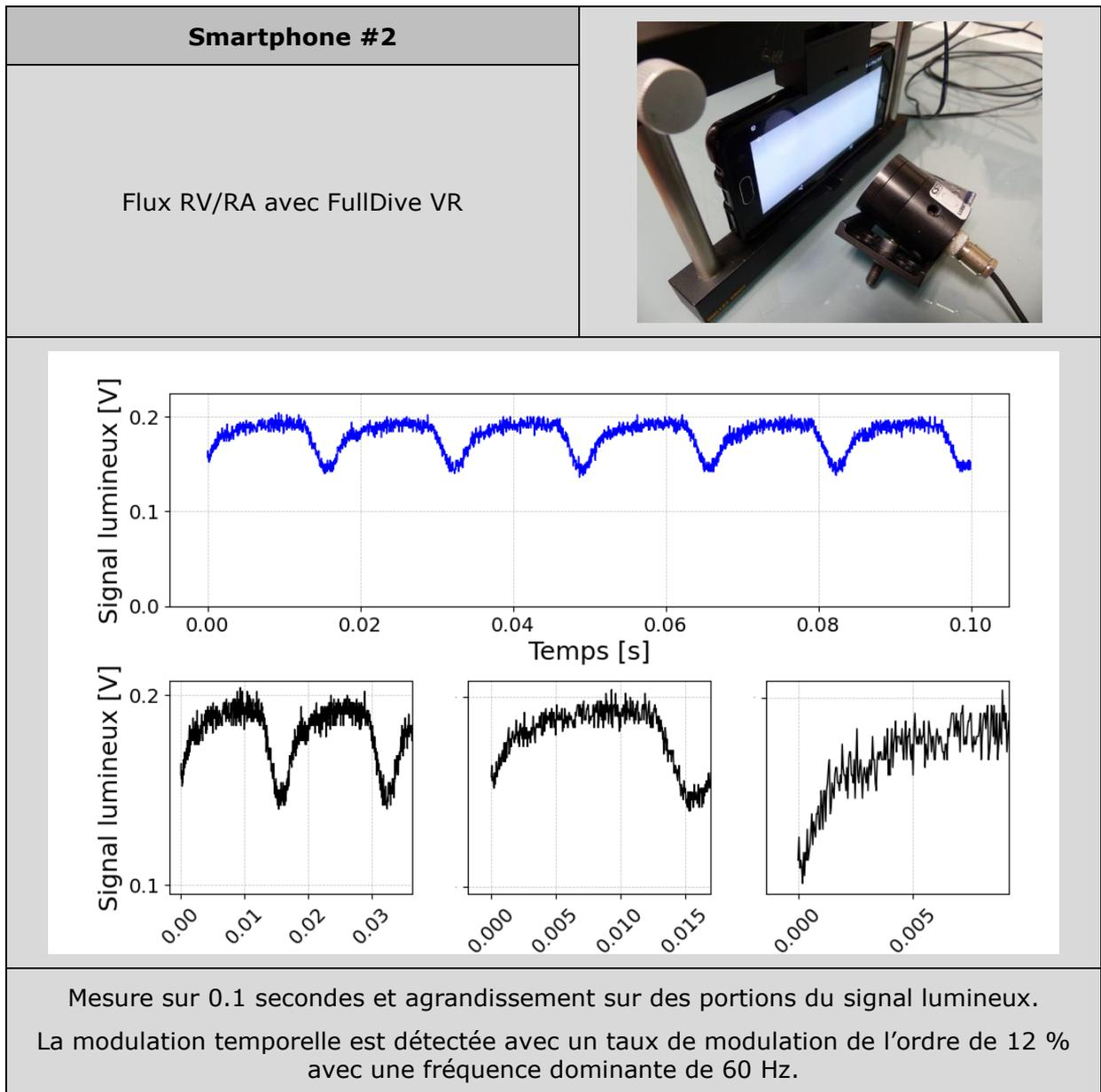


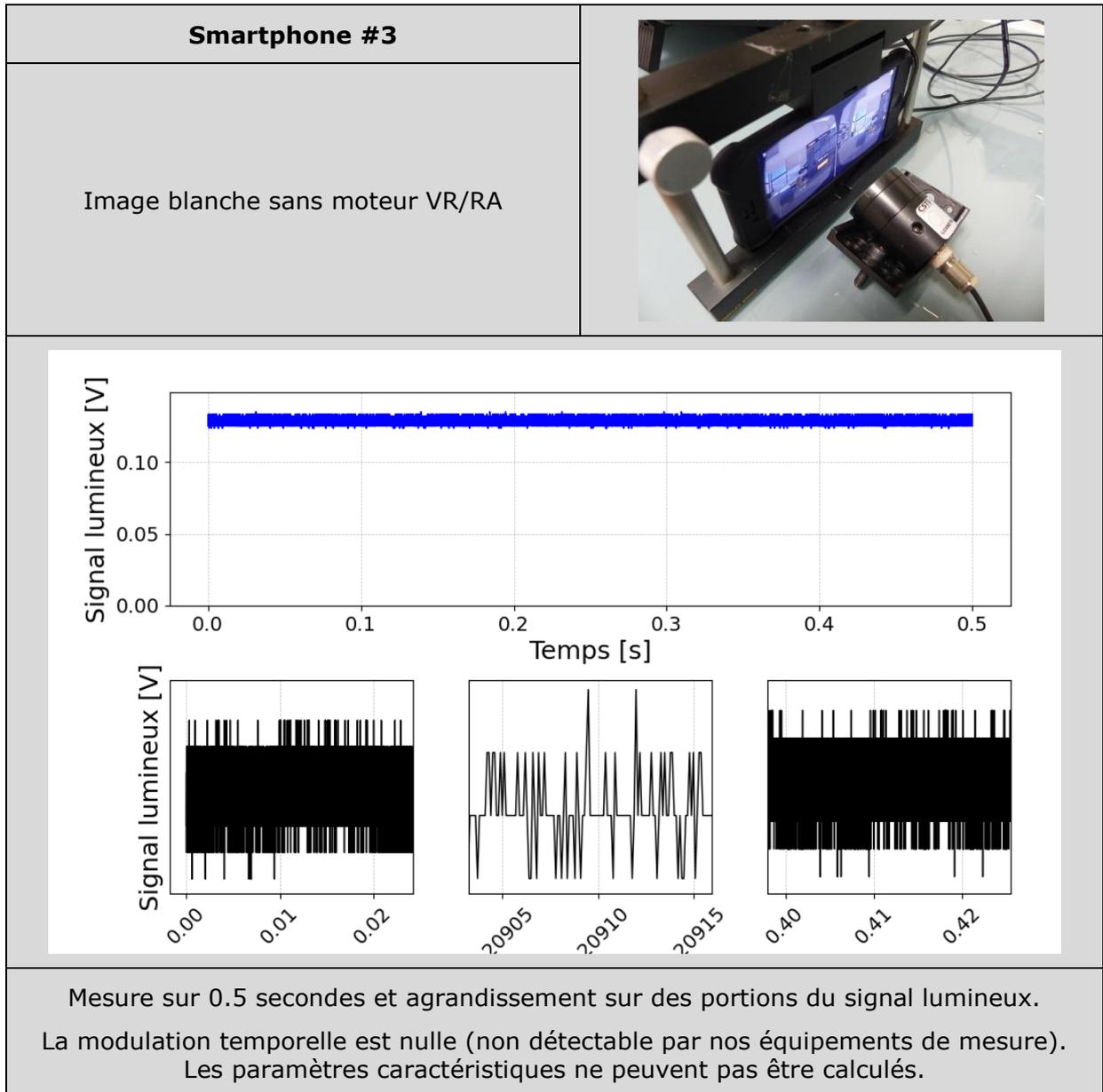


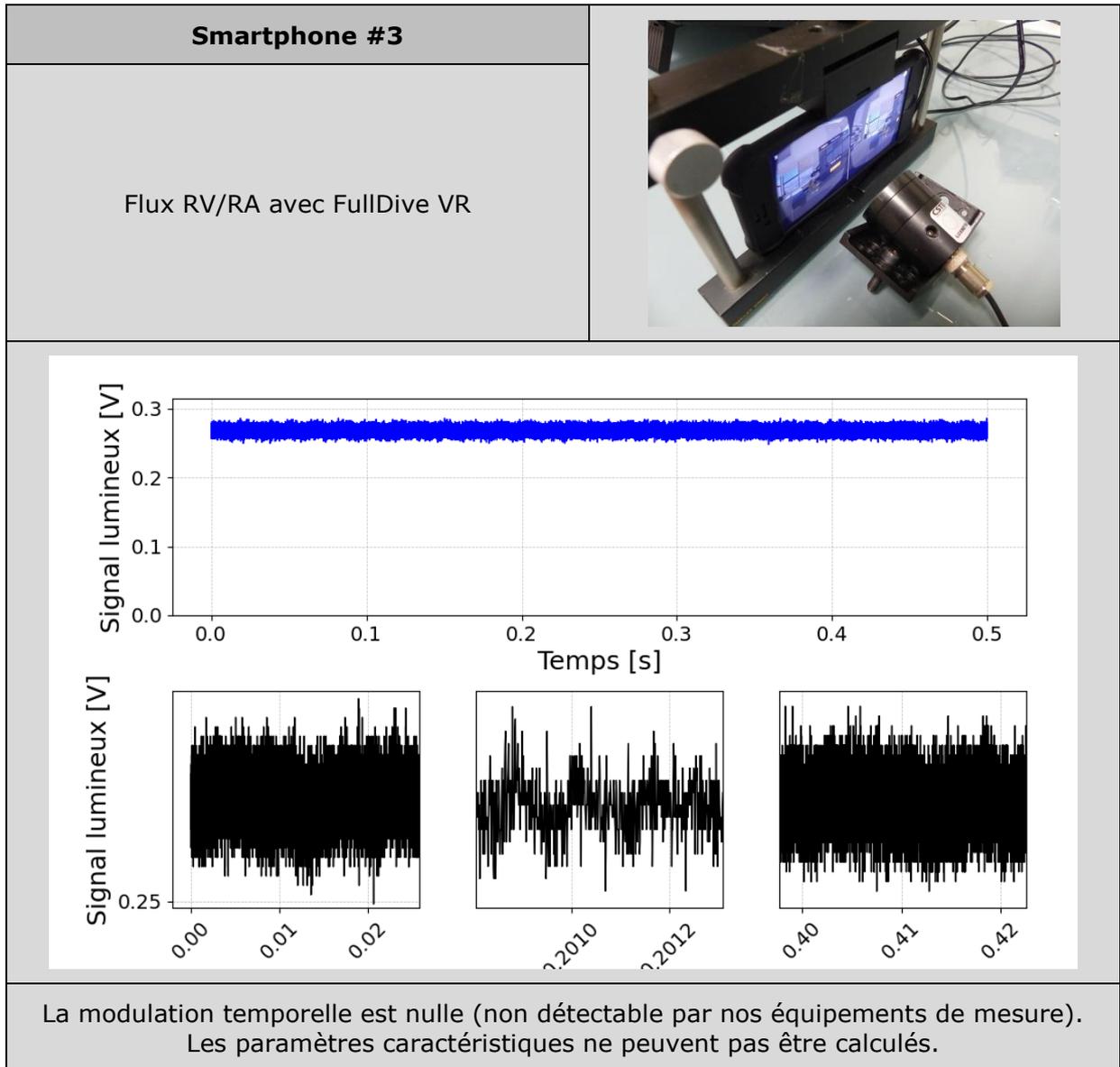












### 3.3 - Synthèse des résultats de la caractérisation de la modulation temporelle

Tous les casques testés produisent un éclairage des yeux présentant une très forte modulation temporelle périodique. L'amplitude de modulation est de l'ordre de 100% : l'éclairage atteint toujours zéro pendant un cycle de modulation (existence d'une phase de « noir »).

Les mesures effectuées dans la présente étude confirment la conclusion d'une étude précédente effectuée par le CSTB pour l'Anses en mai 2017<sup>2</sup> sur un seul modèle de casque. Cette étude mettait en évidence que la technique de "black frame insertion" (BFI) utilisée dans les afficheurs des casques de RV produisait une forte modulation temporelle de la lumière à une fréquence supérieure à la fréquence critique de fusion.

Cette modulation est toujours présente pour tous les casques testés dans cette étude, même lorsque les images sont stationnaires. La fréquence dominante correspond à la fréquence de rafraîchissement électronique des trames. Elle est comprise entre 70 Hz et 90 Hz pour les casques testés. Les formes d'ondes ne sont pas sinusoïdales et on mesure des harmoniques qui ont une amplitude non négligeable jusqu'à 300 ou parfois 500 Hz.

Deux casques ont des formes d'onde ayant un rapport cyclique égal à 0.5, ce qui signifie que les durées de « noir » sont égales aux durées d'éclairage lumineux.

Tous les autres casques ont une forme d'onde de type pulsée avec un rapport cyclique inférieur à 50%, de l'ordre de 2% à 10%, ce qui signifie que la durée du « noir » est 4 à 9 fois plus importante que la durée de l'éclairage. On peut donc considérer que l'éclairage de l'œil est réalisé en mode « impulsionnel ».

Nous avons constaté que le rapport cyclique n'est pas lié au réglage de luminosité des casques. Lorsqu'on varie la luminosité de l'afficheur, c'est l'amplitude de l'éclairage qui augmente, pas le rapport cyclique.

Pour un seul des casques testés (un ancien modèle qui n'est plus commercialisé), nous avons constaté que les modulations temporelles sur l'œil droit et sur l'œil gauche n'étaient pas en phase : les signaux mesurés étaient en quadrature de phase (déphasage de 45° : quand un œil reçoit le maximum de lumière, l'autre œil ne reçoit pas de lumière). Ce phénomène n'a été observé dans aucun autre casque. Nous ne savons pas s'il s'agit d'un mode d'affichage délibérément déphasé ou s'il s'agit d'un défaut du casque. Pour les autres casques, les éclairages de l'œil droit et de l'œil gauche sont parfaitement en phase. Nous n'avons pas connaissance de travaux concernant les effets biologiques ou sanitaires de modulation périodiques déphasées entre œil gauche et œil droit.

---

<sup>2</sup> CRD sur l'exposition lumineuse n°2016-CRD-15

Il n'y a pas d'indice normalisé applicable aux écrans ou aux afficheurs pour quantifier les effets liés à la modulation temporelle de la lumière qu'ils produisent. Dans cette étude, nous avons choisi d'évaluer trois indices utilisés dans le domaine de l'éclairage pour caractériser les effets de la modulation temporelle des lampes et des luminaires. Il est important de noter que ces indices ont été définis pour des sources lumineuses relativement ponctuelles situées dans le centre du champ de vision, et non pour des sources étendues illuminant une grande partie du champ de vision, comme c'est le cas des afficheurs caractérisés dans cette étude. Les indices normalisés de visibilité des effets de la modulation temporelle sont les suivants :

- Pst-Im (indice de visibilité du papillotement normalisé par l'IEC et la NEMA)
- SVM (indice de visibilité de l'effet stroboscopique normalisé par l'IEC et la NEMA)
- FI (flicker index normalisé par l'IESNA)

Pour tous les casques testés, ces trois indices ont des valeurs largement supérieures aux seuils de visibilité définis pour un observateur moyen (Pst-Im=1, SVM = 1, FI = 10%), ce qui indique que les modulations temporelles mesurées sont très probablement détectables par le système neuro-visuel humain, bien que les fréquences de modulation soient supérieures à la fréquence critique de fusion. Le rapport Anses sur les LED de 2019, ainsi que la norme américaine IEEE 1789 indiquent que l'exposition à des lumières modulées au-delà de la fréquence critique de fusion est associée à des effets neurobiologiques et des effets sanitaires comme le déclenchement de maux de tête et de migraine. Selon l'analyse de risques présentée dans la norme IEEE 1789, les caractéristiques de modulation temporelle des casques de RV (fréquences 70 HZ à 90 Hz avec un taux de modulation 100%) correspondent à un niveau de risque sanitaire "moyen", "sérieux" ou "élevé". Cependant, cette analyse de risque est applicable aux LED de haute intensité utilisés en éclairage et son applicabilité aux écrans n'a pas été étudiée.

L'effet visuel de « phantom array » fait actuellement l'objet de recherches et on ne dispose encore d'aucun indice pour caractériser la visibilité de cet effet qui se manifeste par l'apparition d'images multiples d'une source de lumière modulée pendant une saccade visuelle.

Les mesures complémentaires réalisées sur des casques avec des séquences d'images non stationnaires et non uniformes, issus de flux vidéo typiques (jeux et animations) ont confirmé que la modulation temporelle est toujours présente avec les mêmes caractéristiques que dans le cas d'images blanches stationnaires. La modulation temporelle est donc intrinsèquement présente dans tous les cas d'usage des casques testés.

Les mesures réalisées avec des Smartphones munis d'application de RV en 3D permettent d'aboutir à trois conclusions :

- La modulation temporelle de la lumière émise par les écrans des 3 Smartphones testés est faible, voire indétectable. Le smartphone #1 et le smartphone #3 ont une modulation temporelle quasiment nulle. Le smartphone #2 présente une faible modulation temporelle avec un taux d'environ 3% à une fréquence dominante de 60 Hz.
- Lors d'utilisation des applications de réalité virtuelle en 3D, la modulation temporelle des écrans des Smartphones #1 et # 3 ne change pas : elle reste très faible voire indétectable. En revanche, l'utilisation d'une application de RV sur le smartphone #2 augmente la modulation temporelle à un taux de 11%, avec toujours une fréquence dominante de 60 Hz.
- Les écrans des Smartphones testés, même utilisés avec des applications de RV en 3D, ne présentent aucune des caractéristiques de modulation temporelle mesurées pour les casques de RV.

---

## 4 - EVALUATION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES RAYONNES

---

### 4.1 - Méthodologie retenue

L'ensemble des casques de réalité virtuelle ou augmentée vendus dans le commerce doivent être conformes à la directive RED (2014/53/UE), en termes de compatibilité électromagnétique et d'exposition des personnes (normes EN 50360, 50361, 5071). Il ne s'agissait pas dans cette étude de réaliser l'ensemble des essais normalisés liés à la directive et à la problématique de l'exposition des personnes, mais d'investiguer et analyser les rayonnements électromagnétiques générés par l'utilisation de ces casques au niveau de la tête de l'utilisateur.

Les sources identifiées d'émission potentielles de champs électromagnétiques à proximité du casque sont d'une part les émetteurs radiofréquences qui transmettent du contenu entre le casque et l'ordinateur ou les capteurs externes (WLAN type Bluetooth ou Wifi, émetteur 3G ou 4G) et d'autre part l'électronique embarquée dans le casque (écran, capteurs, composants, cartes et circuits).

La caractérisation des niveaux d'exposition de la tête de l'utilisateur en termes de restrictions de base (recommandation européenne 1999/519/CE) nécessiterait de réaliser une évaluation de la densité de courant électrique ou selon la fréquence du débit d'absorption spécifique, sur l'ensemble de la bande de fréquences entre quelques kHz et 6 GHz. Cela n'est techniquement pas possible.

Des mesures réglementaires de DAS tête sont réalisées par les constructeurs uniquement lorsque le casque intègre des émetteurs de type 3G, 4G ou 5G (normes EN 50360). Et des mesures réglementaires de compatibilité électromagnétiques sont réalisées en laboratoire pour le marquage CE (mesures en émission à 3 mètres en chambre anéchoïque dans le cadre de la directive 2014/30/UE).

Dans ce contexte, la méthodologie retenue dans cette étude se limite à identifier et caractériser le rayonnement de champs électromagnétiques des casques en champ proche (à l'emplacement de la tête de l'utilisateur) avec des moyens d'essais « chap lointain » de type sondes isotropiques de champ électrique ou magnétique et analyseur de spectre.

Ces mesures de niveau de champs électromagnétiques permettront de connaître les bandes de fréquences des rayonnements CEM de chaque casque, d'analyser la variabilité du niveau de rayonnement en fonction du mode de fonctionnement du casque : type de scénario, activation des différents capteurs, etc.

Les grandeurs mesurées sont des niveaux de champ électrique ou magnétique. S'il s'avère que, pour certaines fréquences, ces niveaux mesurés dépassent les valeurs limites d'exposition, il conviendra de poursuivre l'étude en réalisant des mesures de densités de

courant et/ou de débit d'absorption spécifique. Ce qui, en fonction de la bande de fréquences d'intérêt, pourra nécessiter la mise au point de banc d'essai spécifique non conventionnel.

#### 4.2 - Mise au point de l'essai de caractérisation du rayonnement électromagnétique

Le CSTB a acheté un casque (casque #9, casque autonome) avec lequel des mesures exploratoires ont été réalisées en laboratoire. L'objectif était de caractériser qualitativement le spectre des émissions rayonnées à proximité du casque et plus particulièrement le rayonnement des composants électroniques ; le casque utilisé n'ayant pas d'émetteurs radiofréquences de type 3G, 4G ou Wifi.

Ces mesures ont été réalisées en chambre anéchoïque afin d'avoir un niveau de bruit électromagnétique faible et non perturbé (laboratoire Phéline au CSTB).

Plusieurs sondes électriques et magnétiques de champs proches, reliées à un analyseur de spectre ont été placées à 3 cm du casque en fonctionnement (avec un scénario de montagne russe) - Figure 6. La bande de fréquences investiguée avec les différentes sondes est de 9 kHz à 3 GHz.



Figure 6 : mesures qualitatives des émissions de champs électromagnétiques en laboratoire (CSTB)

Des émissions significatives liées à l'électronique du casque sont observées entre 9 kHz et une dizaine de MHz. Aucune émission significative n'a été observée au-dessus de 10 MHz.

Pour illustration ces résultats, des exemples de spectres mesurés sont donnés sur les Figure 7 et Figure 8. On peut observer de nombreux signaux émis qui émergent du niveau de bruit de fond. Il s'agit de champs rayonnés, dans les bandes de fréquences dites intermédiaires, liés à la circulation de courants électriques dans les composants, cartes et circuits électroniques présents dans le casque.



Figure 7 : exemple de résultat d'analyse spectrale entre 9 kHz et 100 kHz (à gauche) et entre 100 kHz et 500 kHz (à droite)

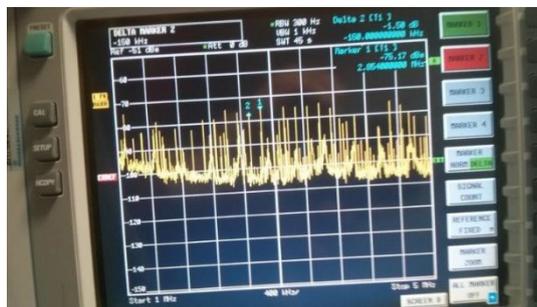


Figure 8 : exemple de résultat d'analyse spectrale entre 1 MHz et 5 MHz

Cette campagne de mesures qualitatives réalisées au préalable au CSTB sur le casque #9 a permis de valider l'hypothèse que l'on pouvait envisager à priori : comme c'est le cas pour tout équipement électronique, la circulation de courant électrique dans les composants, cartes et circuits peut générer un rayonnement de champs électromagnétiques dans les bandes de fréquences dites intermédiaires, entre quelques kHz et quelques MHz.

Au-delà d'une dizaine de MHz, seuls les émetteurs radiofréquences installés dans le casque (3G, 4G, Wifi) pourraient générer des champs électromagnétiques, de façon équivalente à un téléphone mobile ou un carte Wifi.

Ainsi, pour cette étude, les bandes de fréquences d'intérêt sont les fréquences intermédiaires, entre 9 kHz et quelques dizaines de MHz, et les radiofréquences avec les bandes Wifi et téléphonie mobile réparties entre 700 MHz et 6 GHz.

Il est donc choisi pour la campagne d'essais d'utiliser deux sondes de mesures de champs, reliés à l'analyseur de spectre Narda SRM 3006 :

- une sonde isotropique de mesure de champ magnétique dans la bande de fréquences 9 kHz – 250 MHz (« BF »)
- une sonde isotropique de mesure de champ électrique dans la bande de fréquences 420 MHz – 6 GHz (« HF »)

Il n'y aura pas de mesures réalisées entre 250 MHz et 420 MHz. Il n'y a pas d'émetteurs radiofréquences intégrés aux casques dans cette bande de fréquences et l'ajout d'une troisième sonde de mesure, pour prendre en compte ces fréquences, augmenterait significativement le temps de réalisation de l'essai pour chaque casque.

### 4.3 - Banc d'essai

Deux bancs d'essais ont été mis au point pour la caractérisation de chaque casque de réalité virtuelle, à partir de supports en plastique « tête » (support de perruque) – cf. Figure 9 :

- un banc d'essai pour les mesures dans la bande de fréquences BF 9 kHz – 250 MHz
- un banc d'essai pour les mesures dans la bande de fréquences HF 420 MHz – 6 GHz

Pour chaque banc, la sonde est placée à l'intérieur du support plastique et l'ensemble est fixé sur une planche en bois. Chaque casque peut être placé sur le support de façon identique à son positionnement sur une tête.

L'ensemble tête / sonde / casque peut être facilement déplacé de façon dynamique à la main dans toutes les orientations, afin de simuler des mouvements de la tête et activer les capteurs intégrés dans le casque (accéléromètres, gyroscopes, etc.).

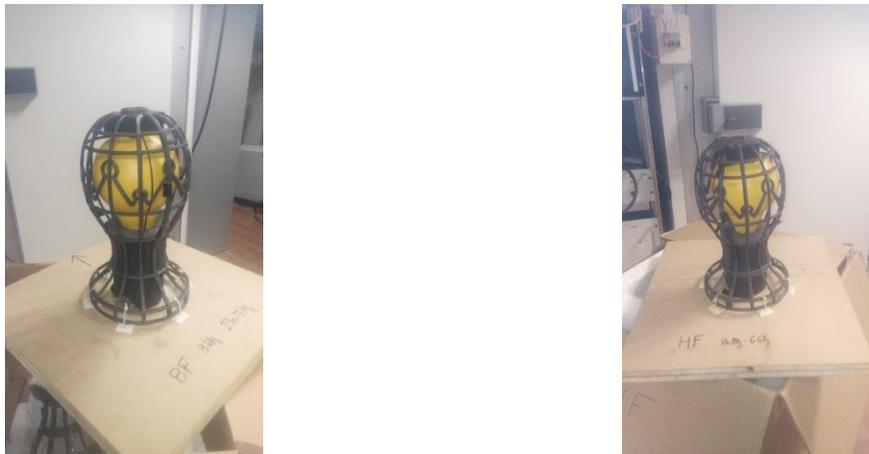


Figure 9 : bancs d'essai BF (à gauche) et HF (à droite)

Une illustration d'un des deux bancs d'essai avec chaque casque mesuré est donnée ci-dessous.

Casque #1			
Casque #2			
Casque #3			
Casque #4			
Casque #5			
Casque #6			
Casque #7			
Casque #8 Avec module Wifi			
Casque #9 (autonome)			

#### 4.4 - Bandes de fréquences de mesure

Pour déterminer les niveaux d'exposition via une analyse spectrale des niveaux de champs électromagnétique, les bandes de fréquences de mesure de chacune des deux sondes sont subdivisées en sous bandes de mesure. La mesure du niveau de champ intégré dans chaque sous bande est réalisée avec des paramètres de filtrage adaptés (RBW).

Les sous bandes, décrites dans le Tableau 3 et le Tableau 4, sont celles définies par le protocole de mesure de l'ANFR utilisé pour la conformité des niveaux d'exposition aux installations radioélectriques. Elles correspondent à un ou plusieurs services de télécommunications

Id	F min – F max	Services	RBW	VLE A/m	VLE dBA/m
BF_1	9 kHz – 100 kHz		50 Hz	5	14.0
BF_2	100 kHz – 1 MHz	Services HF	300 Hz	0,73	-2.7
BF_3	1 MHz – 30 MHz	Services HF	30 kHz	0.073	-22.7
BF_4	30 MHz – 47 MHz	PMR (Réseaux radio mobile professionnels)	30 kHz		
BF_5	47 MHz– 68 MHz	TV	30 kHz		
BF_6	68 MHz – 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore (FM – RNT)	10 kHz		
BF_7	87,5 MHz – 108 MHz	Radiodiffusion sonore (FM)	20 kHz		
BF_8	108 MHz – 174 MHz		50 kHz		
BF_9	174 MHz – 250 MHz	Radiodiffusion sonore (RNT)	50 kHz		

Tableau 3 : sous bandes de fréquences de mesure en BF

Id	F min – F max	Services	RBW	VLE V/m	VLE dBV/m
HF_1	420 MHz – 470 MHz	PMR, balises, objets communicants	50 kHz	28.2	89.0
HF_2	470 MHz – 694 MHz	TV	100 kHz	29.8	89.5
HF_3	694 MHz – 703 MHz	PMR, balises, objets communicants	20 kHz	36.2	91.2
HF_4	703 MHz – 733 MHz	Téléphonie Mobile 700 UL	30 kHz	36.5	91.2
HF_5	733 MHz – 758 MHz	PMR – BALISES – Objets communicants	30 kHz	37.2	91.4
HF_6	758 MHz – 790 MHz	Téléphonie Mobile 700 DL	30 kHz	37.9	91.6
HF_7	790 MHz – 830 MHz	Téléphonie Mobile 800 DL	50 kHz	38.6	91.7
HF_8	830 MHz – 870 MHz	Téléphonie Mobile 800 UL	50 kHz	39.6	92.0
HF_9	870 MHz – 920 MHz	Téléphonie Mobile 900 UL	50 kHz	40.6	92.2
HF_10	920 MHz – 960 MHz	Téléphonie Mobile 900 DL	50 kHz	41.7	92.4
HF_11	960 MHz – 1710 MHz	Radars, balises, FH	200 kHz	42.6	92.6
HF_12	1710 MHz – 1800 MHz	Téléphonie Mobile 1800 UL	100 kHz	56.9	95.1
HF_13	1800 MHz – 1880 MHz	Téléphonie Mobile 1800 DL	50 kHz	58.3	95.3
HF_14	1880 MHz – 1900 MHz	DECT	30 kHz	59.6	95.5

HF_15	1900 MHz – 1920 MHz	Téléphonie Mobile Bande 1900 (usages pro)	30 kHz	59.9	95.6
HF_16	1920 MHz – 2100 MHz	Téléphonie Mobile 2100 UL	100 kHz	60.2	95.6
HF_17	2100 MHz – 2170 MHz	Téléphonie Mobile 2100 DL	50 kHz	61.0	95.7
HF_18	2170 MHz – 2400 MHz		100 kHz		
HF_19	2400 MHz– 2500 MHz	Réseaux locaux radioélectriques (Wi-Fi)	50 kHz		
HF_20	2500 MHz – 2600 MHz	Téléphonie Mobile 2600 UL	100 kHz		
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	Téléphonie Mobile 2600 DL	50 kHz		
HF_22	2690 MHz – 3400 MHz		200 kHz		
HF_23	3400 MHz – 3800 MHz	TM 3600 DL et UL	100 kHz		
HF_24	3800 MHz – 5150 MHz	Radars, BLR, FH	500 kHz		
HF_25	5150 MHz – 5725 MHz	Réseaux locaux radioélectriques (Wi-Fi)	300 kHz		
HF_26	5725 MHz – 6000 MHz	Radars, BLR, FH	200 kHz		

Tableau 4 : sous bandes de fréquences de mesure en HF

## 4.5 - Protocole d'essai

### 4.5.1 - Déroulement d'un essai

Pour chaque casque, les mesures sont réalisées successivement avec les deux bancs d'essai : celui avec la sonde BF (9 kHz – 250 MHz) puis celui avec la sonde HF (420 MHz – 6 GHz).

Pour chaque banc d'essai, une mesure du niveau ambiant est d'abord réalisée pendant 6 minutes (mesure sans le casque).

Ensuite le casque est installé sur le support plastique, autour de la sonde de mesure. Un scénario de réalité virtuelle est envoyé dans le casque. Si besoin un scotch est placé sur le capteur de présence afin que le scénario ne soit pas mis en veille pendant la durée de la mesure (l'écran de l'ordinateur permet de vérifier l'activité du scénario).

Un enregistrement continu de l'ensemble des sous bandes de fréquences associées à la sonde de mesure (Tableau 3 et Tableau 4) est réalisé pendant 30 minutes :

- 15 minutes d'enregistrement en statique : l'ensemble support / sonde / casque est immobile.
- 15 minutes d'enregistrement en dynamique : l'ensemble support / sonde / casque est manipulé manuellement pour générer des mouvements lents de rotation de la tête selon les trois axes. Les commandes des manettes sont aussi utilisées afin d'activer le maximum de capteurs du casque.

L'analyseur de spectre (Narda SRM 3006, utilisé dans le mode 'Safety Level') calcule le niveau de champ maximum intégré dans chaque sous bande de fréquences.

A l'issue de ces enregistrements, avec et sans casque, et en fonction des résultats, des mesures spectrales sont réalisées sur plusieurs sous bandes de fréquences. Elles permettent d'illustrer le comportement fréquentiel des rayonnements mesurés.

#### **4.5.2 - Résultats des essais**

Pour chaque casque, les résultats donnés dans les tableaux du paragraphe 4.6, pour chaque sous bande de fréquences, le niveau de champ magnétique (exprimé en dBA/m) ou électrique (exprimé en dBV/m) intégré maximum.

Pour les fréquences supérieures à 100 kHz, et en conformité avec la recommandation européenne 1999/519/CE, le niveau maximum affiché est calculé à partir d'une moyenne glissante sur une durée de 6 minutes (moyenne glissante sur 30 minutes, qui est la durée totale des enregistrements pour chaque casque).

Pour chaque casque et sous bandes de fréquences, le niveau ambiant est donné (niveau sans le casque) afin de qualifier et quantifier l'influence du casque sur les champs rayonnés.

Enfin, la valeur limite d'exposition est donnée pour information pour chaque sous bande de fréquences.

Les cases identifiées en jaune dans les tableaux de résultats correspondent aux sous bandes de fréquences dans lesquelles des rayonnements significatifs liés au casque en fonctionnement ont été mesurés. La valeur donnée (dB) correspond à l'augmentation du niveau de champ mesuré en présence du casque en fonctionnement (position statique puis dynamique).

Enfin des exemples de spectres mesurés avec et sans casque sont donnés dans le paragraphe 4.7 afin d'illustrer le comportement spectral des signaux rayonnés par les différents casques.

## 4.6 - Résultats des mesures de niveaux de champs électromagnétiques rayonnés

### Casque #1 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dB(A)/m	dB(A)/m	dB(A)/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-60.90	-53.85	14	+7.1 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-75.65	-62.33	-2.7	+13.3 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.28	-62.86	-20.7	+13.4 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-77.86	-77.50		+0.4 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.11	-74.72		+0.4 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.65	-74.65		+0.0 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.11	-74.11		+0.0 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-68.81	-68.75		+0.1 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.58	-68.38		+0.2 dB

### Casque #1 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.12	-18.05	29.0	+0.1 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.48	-13.41	29.5	+0.1 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.64	-27.61	31.2	+0.0 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-22.93	-22.98	31.2	-0.1 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-23.75	-23.78	31.4	-0.0 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.73	-22.60	31.6	+0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-19.12	-20.45	31.7	-1.3 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.24	-21.98	32.0	+0.3 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.56	-20.40	32.2	+1.2 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-22.10	-21.67	32.4	+0.4 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.32	-13.27	32.6	+0.1 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.76	-25.59	35.1	+0.2 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.79	-25.32	35.3	+0.5 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.10	-31.98	35.5	+0.1 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-31.95	-32.32	35.6	-0.4 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.80	-22.75	35.6	+0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-25.22	-24.84	35.7	+0.4 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-19.95	-19.92		+0.0 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-7.54	-8.94		-1.4 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.78	-22.76		+0.0 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-22.98	-22.82		+0.2 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.29	-12.29		+0.0 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.69	-11.72		-0.0 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.29	-0.36		-0.1 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.62	-0.55		+0.1 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-0.96	-0.93		+0.0 dB

Tableau 5 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #1

Casque #2 : I

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-60.98	-52.93	14	+8.0 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-81.63	-71.06	-2.7	+10.6 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.65	-62.25	-20.7	+14.4 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-78.40	-78.51		-0.1 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.00	-74.76		+0.2 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.08	-74.13		+1.0 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.29	-75.09		-0.8 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-69.02	-69.11		-0.1 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.76	-68.83		-0.1 dB

Casque #2 : I

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.32	-18.43	29.0	-0.1 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.86	-14.01	29.5	-0.2 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-29.18	-28.71	31.2	+0.5 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-23.13	-23.20	31.2	-0.1 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-24.74	-24.64	31.4	+0.1 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-23.24	-23.19	31.6	+0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-20.22	-21.98	31.7	-1.8 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.81	-23.01	32.0	-0.2 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.52	-21.64	32.2	-0.1 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-22.11	-22.02	32.4	+0.1 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.77	-13.69	32.6	+0.1 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.98	-26.28	35.1	-0.3 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.78	-25.88	35.3	-0.1 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.65	-32.61	35.5	+0.0 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-33.34	-33.06	35.6	+0.3 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-23.03	-23.15	35.6	-0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-26.03	-26.93	35.7	-0.9 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-20.27	-20.38		-0.1 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-6.23	-7.66		-1.4 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-23.15	-23.07		+0.1 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-23.35	-23.62		-0.3 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.58	-12.64		-0.1 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-12.10	-12.12		-0.0 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.77	-0.76		+0.0 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-1.04	-1.04		+0.0 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-1.49	-1.54		-0.0 dB

Tableau 6 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #2

Casque #3 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-60.00	-56.53	14	+3.5 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-75.00	-55.48	-2.7	+19.5 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.22	-65.71	-20.7	+10.5 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-77.80	-77.58		+0.2 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.66	-74.67		-0.0 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.95	-74.74		+0.2 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.01	-73.94		+0.1 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-68.71	-68.75		-0.0 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.52	-68.45		+0.1 dB

Casque #3 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.06	-17.94	29.0	+0.1 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.37	-13.24	29.5	+0.1 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.71	-27.61	31.2	+0.1 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-22.60	-22.63	31.2	-0.0 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-23.72	-23.45	31.4	+0.3 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.56	-22.52	31.6	+0.0 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-20.66	-19.87	31.7	+0.8 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.17	-22.12	32.0	+0.1 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.44	-21.46	32.2	-0.0 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-21.99	-21.73	32.4	+0.3 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.17	-13.19	32.6	-0.0 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.59	-25.55	35.1	+0.0 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.67	-24.82	35.3	+0.9 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.24	-32.08	35.5	+0.2 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-32.11	-31.93	35.6	+0.2 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.68	-22.57	35.6	+0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-25.74	-24.09	35.7	+1.7 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-19.90	-19.86		+0.0 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-7.69	-8.45		-0.8 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.81	-22.68		+0.1 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-23.06	-22.68		+0.4 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.18	-12.16		+0.0 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.65	-11.55		+0.1 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.19	-0.20		-0.0 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.50	-0.43		+0.1 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-0.91	-0.86		+0.1 dB

Tableau 7 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #3

Casque #4 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-59.03	-56.83	14	+2.2 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-78.33	-64.97	-2.7	+13.4 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.09	-68.87	-20.7	+7.2 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-78.07	-78.95		-0.9 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-73.98	-74.55		-0.6 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-73.65	-73.87		-0.2 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.63	-74.38		+0.3 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-68.87	-69.19		-0.3 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.55	-68.71		-0.2 dB

Casque #4 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-17.97	-18.01	29.0	-0.0 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.40	-13.44	29.5	-0.0 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.08	-27.84	31.2	-0.8 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-22.37	-22.75	31.2	-0.4 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-24.14	-23.93	31.4	+0.2 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.85	-22.76	31.6	+0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-19.39	-21.03	31.7	-1.6 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.34	-22.62	32.0	-0.3 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.32	-21.24	32.2	+0.1 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-21.60	-22.14	32.4	-0.5 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.14	-13.19	32.6	-0.1 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.78	-25.57	35.1	+0.2 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.62	-25.36	35.3	+0.3 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.13	-32.10	35.5	+0.0 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-32.65	-32.74	35.6	-0.1 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.69	-22.68	35.6	+0.0 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-26.29	-26.74	35.7	-0.4 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-19.83	-19.86		-0.0 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-6.64	-9.14		-2.5 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.76	-22.57		+0.2 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-22.92	-22.94		-0.0 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.12	-12.19		-0.1 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.63	-11.57		+0.1 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.17	-0.27		-0.1 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.50	-0.58		-0.1 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-0.90	-0.95		-0.1 dB

Tableau 8 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #4

Casque #5 : .....

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-57.13	-54.07	14	+3.1 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-78.13	-48.59	-2.7	+29.5 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-75.19	-70.64	-20.7	+4.6 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-78.40	-78.76		-0.4 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.15	-74.57		-0.4 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.09	-74.27		-0.2 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.29	-74.71		-0.4 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-68.58	-68.97		-0.4 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.41	-68.38		+0.0 dB

Casque #5 : .....

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-17.68	-17.78	29.0	-0.1 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.29	-13.25	29.5	+0.0 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.35	-27.70	31.2	-0.3 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-22.85	-22.76	31.2	+0.1 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-23.43	-23.53	31.4	-0.1 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.60	-22.49	31.6	+0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-20.34	-20.41	31.7	-0.1 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.28	-22.23	32.0	+0.1 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.59	-21.48	32.2	+0.1 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-21.50	-21.66	32.4	-0.2 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.05	-13.07	32.6	-0.0 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.69	-25.60	35.1	+0.1 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.38	-25.42	35.3	-0.0 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.07	-31.99	35.5	+0.1 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-31.93	-32.11	35.6	-0.2 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.40	-22.52	35.6	-0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-24.34	-24.92	35.7	-0.6 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-19.81	-19.70		+0.1 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-8.77	-7.44		+1.3 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.74	-22.65		+0.1 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-22.74	-22.91		-0.2 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.06	-12.06		+0.0 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.51	-11.49		+0.0 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.11	-0.04		+0.1 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.36	-0.37		-0.0 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-0.67	-0.68		-0.0 dB

Tableau 9 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #5

**Casque #6 :**

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-57.13	-48.92	14	+8.2 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-78.13	-60.31	-2.7	+17.8 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-75.19	-69.83	-20.7	+5.4 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-78.40	-78.25		+0.2 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.15	-74.99		-0.8 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-74.09	-74.16		-0.1 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.29	-74.38		-0.1 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-68.58	-69.03		-0.5 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.41	-68.55		-0.1 dB

**Casque #6 :**

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-17.32	-17.96	29.0	-0.6 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.35	-13.19	29.5	+0.2 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.79	-26.67	31.2	+1.1 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-22.32	-22.70	31.2	-0.4 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-23.28	-23.85	31.4	-0.6 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.37	-22.49	31.6	-0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-21.66	-21.37	31.7	+0.3 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.16	-22.31	32.0	-0.1 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-20.91	-21.54	32.2	-0.6 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-22.30	-22.19	32.4	+0.1 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-12.84	-12.95	32.6	-0.1 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.60	-25.55	35.1	+0.1 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-24.76	-25.61	35.3	-0.8 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.00	-32.80	35.5	-0.8 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-32.27	-32.25	35.6	+0.0 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.52	-22.37	35.6	+0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-26.89	-26.55	35.7	+0.3 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-19.74	-19.62		+0.1 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-7.62	-8.96		-1.3 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.22	-22.41		-0.2 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-21.06	-22.29		-1.2 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.06	-11.94		+0.1 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.27	-11.22		+0.1 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	0.09	0.03		-0.1 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.22	-0.32		-0.1 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-0.74	-0.62		+0.1 dB

Tableau 10 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #6

Casque #7 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-55.61	-60.46	14	-4.9 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-77.93	-46.27	-2.7	+31.7 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.29	-53.54	-20.7	+22.8 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-77.63	-77.60		+0.0 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.20	-75.03		+0.2 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.07	-75.17		-0.1 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-74.51	-74.47		+0.0 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-69.04	-68.91		+0.1 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-68.70	-68.64		+0.1 dB

Casque #7 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.24	-18.22	29.0	+0.0 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-13.55	-13.51	29.5	+0.0 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-27.90	-27.83	31.2	+0.1 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-23.11	-23.07	31.2	+0.0 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-24.07	-24.08	31.4	-0.0 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.87	-22.93	31.6	-0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-19.84	-21.88	31.7	-2.0 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.30	-22.46	32.0	-0.2 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-21.54	-21.70	32.2	-0.2 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-22.30	-22.19	32.4	+0.1 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-13.49	-13.46	32.6	+0.0 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-25.85	-25.68	35.1	+0.2 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-25.88	-25.88	35.3	+0.0 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.38	-32.20	35.5	+0.2 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-31.93	-32.15	35.6	-0.2 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-22.92	-22.85	35.6	+0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-25.07	-25.15	35.7	-0.1 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-20.03	-20.05		-0.0 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-8.76	-9.77		-1.0 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.90	-22.94		-0.0 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-22.63	-23.12		-0.5 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-12.44	-12.44		+0.0 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-11.85	-11.87		-0.0 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-0.51	-0.51		+0.0 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-0.72	-0.78		-0.1 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-1.21	-1.11		+0.1 dB

Tableau 11 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #7

Casque #8 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-60.16	-51.00	14	+9.2 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-79.08	-62.03	-2.7	+17.1 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.58	-51.27	-20.7	+25.3 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-77.83	-78.07		-0.2 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.31	-75.34		-0.0 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.35	-75.13		+0.2 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-75.05	-73.98		+1.1 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-69.34	-69.38		-0.0 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-69.06	-69.03		+0.0 dB

Casque #8 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.97	-18.79	29.0	+0.2 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-14.25	-14.28	29.5	-0.0 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-29.17	-29.01	31.2	+0.2 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-23.64	-23.76	31.2	-0.1 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-24.53	-24.54	31.4	-0.0 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-23.64	-23.59	31.6	+0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-21.56	-20.65	31.7	+0.9 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-23.49	-23.08	32.0	+0.4 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-22.31	-22.42	32.2	-0.1 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-23.01	-22.34	32.4	+0.7 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-14.10	-14.13	32.6	-0.0 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-26.57	-26.43	35.1	+0.1 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-26.81	-26.55	35.3	+0.3 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-33.14	-32.87	35.5	+0.3 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-33.30	-33.25	35.6	+0.0 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-23.59	-23.49	35.6	+0.1 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-26.82	-26.31	35.7	+0.5 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-20.73	-20.75		-0.0 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-8.54	-7.41		+1.1 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-23.61	-23.67		-0.1 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-23.43	-23.87		-0.4 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-13.02	-13.10		-0.1 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-12.60	-12.63		-0.0 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-1.16	-1.27		-0.1 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-1.43	-1.42		+0.0 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-1.75	-1.91		-0.2 dB

Tableau 12 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #8

Casque #9 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBA/m	dBA/m	dBA/m	
BF_1	9 kHz - 100 kHz	Services HF	-61.93	-58.43	14	+3.5 dB
BF_2	100 kHz - 1 MHz	Services HF	-60.91	-56.00	-2.7	+4.9 dB
BF_3	1 MHz - 30 MHz	PMR	-76.03	-74.71	-20.7	+1.3 dB
BF_4	30 MHz - 47 MHz	TV	-78.59	-78.62		-0.0 dB
BF_5	47 MHz - 68 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.76	-76.03		-0.3 dB
BF_6	68 MHz - 87,5 MHz	Radiodiffusion sonore	-75.18	-75.96		-0.8 dB
BF_7	87,5 MHz - 108 MHz		-75.43	-75.00		+0.4 dB
BF_8	108 MHz - 174 MHz		-69.92	-69.84		+0.1 dB
BF_9	174 MHz - 250 MHz	Radiodiffusion sonore	-69.51	-69.47		+0.0 dB

Casque #9 :

Id	Bande de fréquences		Niveau mesuré	Niveau mesuré	Valeur limite d'exposition	Influence du casque
			sans le casque	avec le casque		
			dBV/m	dBV/m	dBV/m	
HF_1	420 MHz - 470 MHz	PMR, balises	-18.95	-18.75	29.0	+0.2 dB
HF_2	470 MHz - 694 MHz	TV	-14.24	-14.29	29.5	-0.0 dB
HF_3	694 MHz - 703 MHz	PMR, balises	-28.49	-29.00	31.2	-0.5 dB
HF_4	703 MHz - 733 MHz	TM 700 UL	-23.54	-23.74	31.2	-0.2 dB
HF_5	733 MHz - 758 MHz	PMR, balises	-24.62	-24.34	31.4	+0.3 dB
HF_6	758 MHz - 790 MHz	TM 700 DL	-22.58	-22.66	31.6	-0.1 dB
HF_7	790 MHz - 830 MHz	TM 800 DL	-22.03	-22.12	31.7	-0.1 dB
HF_8	830 MHz - 870 MHz	TM 800 UL	-22.69	-22.83	32.0	-0.1 dB
HF_9	870 MHz - 920 MHz	TM 900 UL	-22.39	-22.20	32.2	+0.2 dB
HF_10	920 MHz - 960 MHz	TM 900 DL	-22.60	-22.65	32.4	-0.0 dB
HF_11	960 MHz - 1710 MHz	Radars, balises, FH	-14.04	-14.13	32.6	-0.1 dB
HF_12	1710 MHz - 1800 MHz	TM 1800 UL	-26.46	-26.53	35.1	-0.1 dB
HF_13	1800 MHz - 1880 MHz	TP 1800 DL	-26.56	-26.14	35.3	+0.4 dB
HF_14	1880 MHz - 1900 MHz	DECT	-32.81	-33.05	35.5	-0.2 dB
HF_15	1900 MHz - 1920 MHz	TM 1900	-33.26	-33.11	35.6	+0.1 dB
HF_16	1920 MHz - 2100 MHz	TM 2100 UL	-23.47	-23.51	35.6	-0.0 dB
HF_17	2100 MHz - 2170 MHz	TM 2100 DL	-25.10	-25.01	35.7	+0.1 dB
HF_18	2170 MHz - 2400 MHz		-20.65	-20.74		-0.1 dB
HF_19	2400 MHz - 2500 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-20.40	-23.64		-3.2 dB
HF_20	2500 MHz - 2600 MHz	TM 2600 UL	-22.85	-23.75		-0.9 dB
HF_21	2600 MHz - 2690 MHz	TM 2600 DL	-22.85	-22.36		+0.5 dB
HF_22	2690 MHz - 3400 MHz		-13.01	-13.04		-0.0 dB
HF_23	3400 MHz - 3800 MHz	TM 3600 DL & UL	-12.41	-12.50		-0.1 dB
HF_24	3800 MHz - 5150 MHz	Radars, BLR, FH	-1.08	-1.10		-0.0 dB
HF_25	5150 MHz - 5725 MHz	RLAN (Wifi, etc.)	-1.30	-1.31		-0.0 dB
HF_26	5725 MHz - 6000 MHz	Radars, BLR, FH	-1.68	-1.69		-0.0 dB

Tableau 13 : caractérisation des champs électromagnétiques rayonnés - casque #9

## 4.7 - Résultats d'analyses spectrales

Des exemples de spectres mesurés dans différentes bandes de fréquences et pour différents casques sont donnés dans les figures ci-dessous. Sur chaque graphe on peut visualiser le niveau de bruit ambiant, sans le casque, dans le local de mesure (box de RV du LMC2 pour les casques #1 à #8, laboratoire du CSTB pour le casque #9) et le niveau de champ électrique ou magnétique avec le casque en fonctionnement.

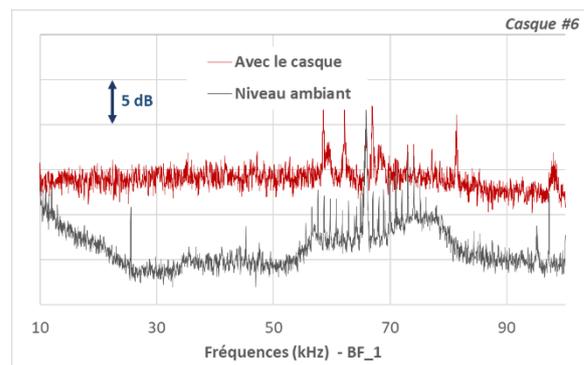
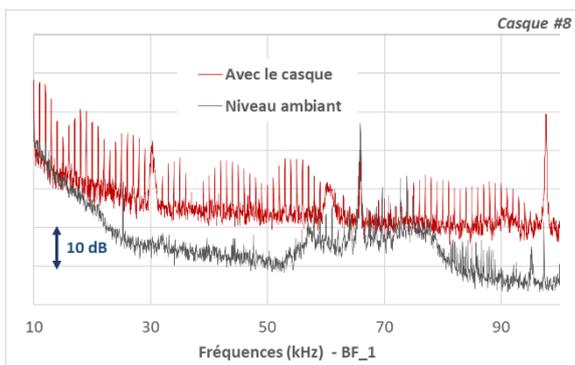
Il faut noter qu'entre 9 kHz et 30 MHz, le niveau de bruit de fond contient déjà des signaux parasites ambiants liés aux équipements électriques et électroniques du laboratoire.

Des signaux significatifs avec les casques en fonctionnement sont mesurés jusqu'à une fréquence d'environ 30 MHz ; leurs caractéristiques spectrales varient fortement en fonction des modèles de casques. L'ensemble de ces signaux sont très stables dans le temps sur la durée de l'essai (30 minutes) et varient très peu en fonction des mouvements du casque (tête statique ou en rotations dynamiques).

Au-delà de 30 MHz, aucun signal lié au fonctionnement du casque n'émerge du niveau de bruit ambiant.

Comme indiqué dans les tableaux du paragraphe 4.6, l'ensemble des niveaux mesurés sont très largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

### 4.7.1 - Exemple de spectres dans les bandes de fréquences impactées



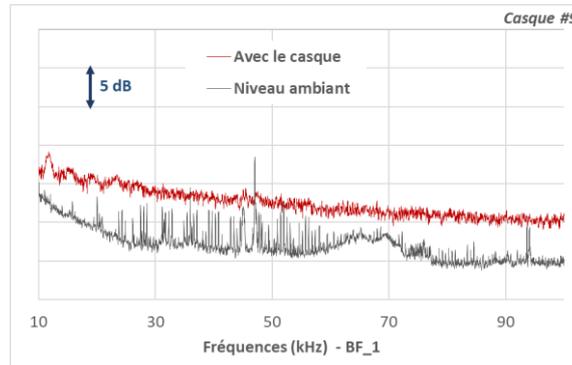


Figure 10 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bande de fréquences 9 kHz – 100 kHz

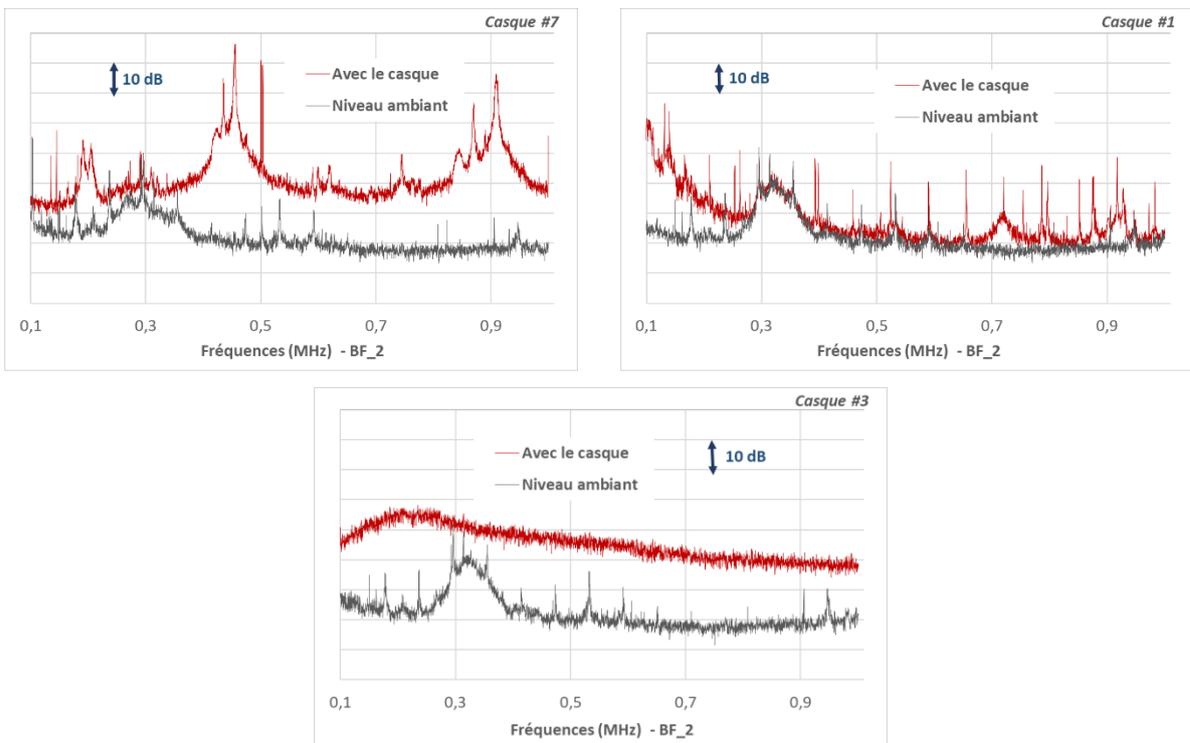
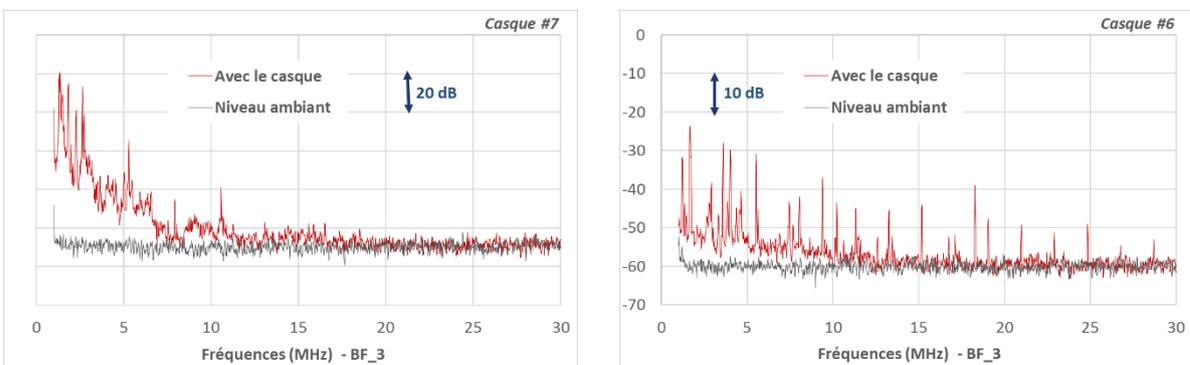


Figure 11 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bande de fréquences 100 kHz – 1 MHz



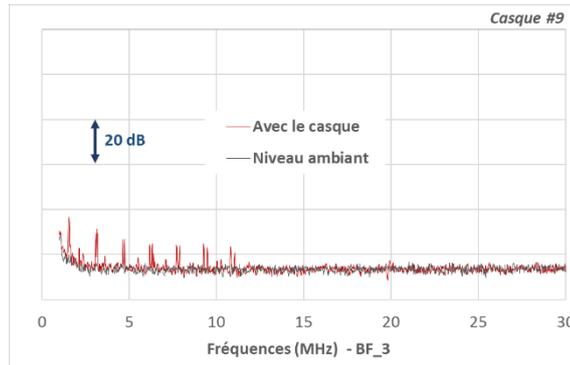


Figure 12 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bande de fréquences 1 MHz – 30 MHz

**4.7.2 - Exemple de spectres dans les bandes de fréquences non impactées**

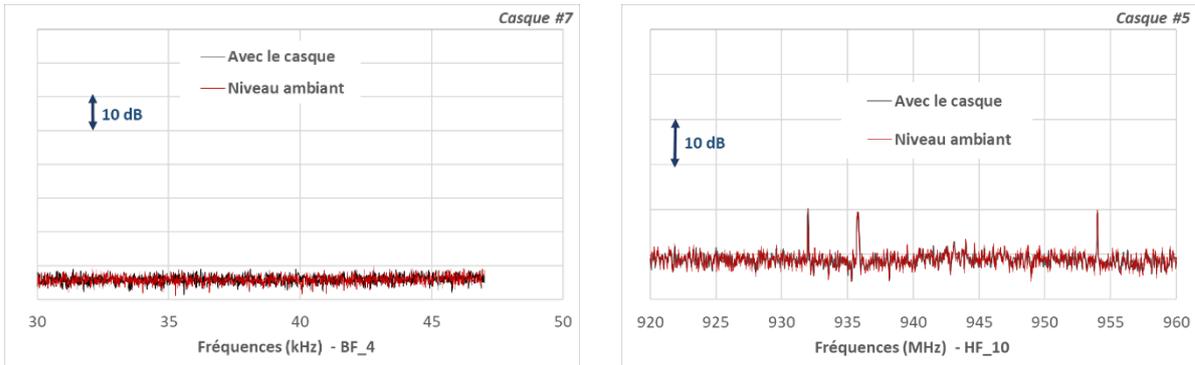


Figure 13 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bandes de fréquences 703 – 733 MHz et 920 – 960 MHz

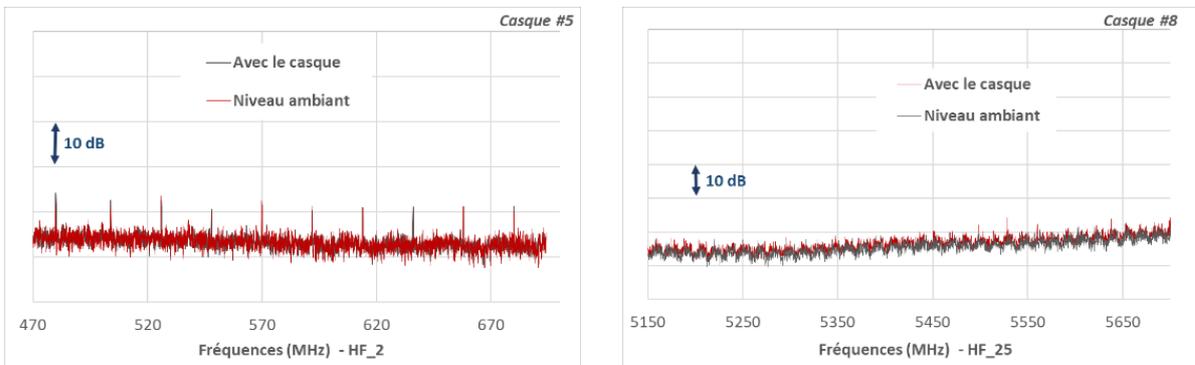


Figure 14 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bandes de fréquences 470 – 694 MHz et 5150 – 5725 MHz

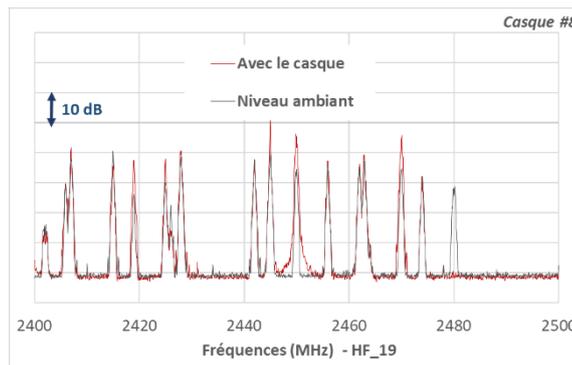


Figure 15 : exemples de mesures spectrales avec et sans casque / bande de fréquences RLAN Wifi 2400 – 2500 MHz

## 4.8 - Synthèse des mesures de champs électromagnétiques rayonnés

L'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences d'un utilisateur de casque de réalité virtuelle a été faite, à partir d'une campagne d'essais sur un échantillon de neuf casques représentatifs du marché : modèles anciens et récents, différentes technologies et capteurs, casques autonomes ou non, liaison filaire ou non, etc. Des mesures exploratoires ont permis la mise au point du banc d'essai avec des sondes isotropiques placées à l'intérieur d'un support représentant une tête sur lequel est placé le casque de réalité virtuelle.

Les niveaux de champs électromagnétiques ont été mesurés pour les différentes bandes de fréquences d'intérêt, situées entre 9 kHz et 6 GHz. Un scénario de réalité virtuelle est envoyé dans le casque et la mesure est réalisée pendant 30 minutes avec le casque en position statique puis en rotation dynamique afin de simuler le comportement de l'utilisateur et d'activer les capteurs de position et d'orientation.

Les résultats sont identiques pour l'ensemble des neuf casques mesurés avec l'identification de divers signaux rayonnés dans les bandes de fréquences intermédiaires, entre 9 kHz et 30 MHz environ. Ces signaux correspondent à des champs électromagnétiques générés par les courants électriques circulant dans les composants, cartes et circuits électroniques intégrés dans les casques (processeur, écran, capteurs, etc.).

Les niveaux mesurés sont très largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

Conformément à la recommandation européenne 199/519/CE ces résultats en niveaux de champs électrique ou magnétique permettent de valider le respect des valeurs limites d'exposition par rapport aux restrictions de base et il n'est ainsi pas nécessaire de réaliser des mesures complexes de densité de courant ou débit d'absorption spécifique dans les bandes de fréquences intermédiaires.

---

## 5 - CONCLUSIONS

---

Ces travaux ont permis d'évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques et de caractériser la modulation temporelle lumineuse générées par le port de casques de réalité virtuelle.

Deux bancs d'essais ont été instrumentés et neuf modèles de casques représentatifs du marché ont été sélectionnés et mesurés, pour la modulation temporelle et pour le champ électromagnétique rayonné.

Suite à l'analyse des résultats de modulation temporelle, des mesures complémentaires sur un casque (avec des séquences d'images non stationnaires et non uniformes) et sur trois Smartphones ont été réalisées.

### **Concernant les mesures de modulation temporelle :**

L'ensemble des casques testés produisent un éclairage des yeux présentant une très forte modulation temporelle périodique. L'amplitude de modulation est de l'ordre de 100% : l'éclairage atteint toujours zéro pendant un cycle de modulation (existence d'une phase de « noir »). Ces résultats confirment la conclusion d'une étude précédente effectuée par le CSTB pour l'Anses en mai 2017<sup>3</sup> et portant sur un seul modèle de casque.

Cette modulation est toujours présente pour tous les casques testés dans cette étude, même lorsque les images sont stationnaires. La fréquence dominante correspond à la fréquence de rafraîchissement électronique des trames. Elle est comprise entre 70 Hz et 90 Hz pour les casques testés. Les formes d'ondes ne sont pas sinusoïdales et des harmoniques d'amplitude non négligeable, jusqu'à 300 ou parfois 500 Hz, sont mesurées.

Deux casques ont des formes d'onde ayant un rapport cyclique égal à 0.5, ce qui signifie que les durées de « noir » sont égales aux durées d'éclairage lumineux. Tous les autres casques ont une forme d'onde de type pulsée avec un rapport cyclique inférieur à 50%, de l'ordre de 2% à 10%, ce qui signifie que la durée du « noir » est 4 à 9 fois plus importante que la durée de l'éclairage. On peut donc considérer que l'éclairage de l'œil est donc réalisé en mode impulsionnel.

Pour un seul des casques testés (casque #5, un ancien modèle qui n'est plus commercialisé), nous avons constaté que les modulations temporelles sur l'œil droit et sur l'œil gauche n'étaient pas en phase : les signaux mesurés étaient en quadrature de phase (déphasage de 45° : quand un œil reçoit le maximum de lumière, l'autre œil ne reçoit pas de lumière). Ce phénomène n'a été observé dans aucun autre casque. Nous ne savons pas s'il s'agit d'un mode d'affichage délibérément déphasé ou s'il s'agit d'un défaut du casque. Pour les autres

---

<sup>3</sup> CRD sur l'exposition lumineuse n°2016-CRD-15

casques, les éclairagements de l'œil droit et de l'œil gauche sont parfaitement en phase. Nous n'avons pas connaissance de travaux concernant les effets biologiques ou sanitaires de modulation périodiques déphasées entre œil gauche et œil droit.

Il n'y a pas d'indice normalisé applicable aux écrans ou aux afficheurs pour quantifier les effets liés à la modulation temporelle de la lumière qu'ils produisent. Dans cette étude, nous avons choisi d'évaluer trois indices utilisés dans le domaine de l'éclairage pour caractériser les effets de la modulation temporelle des lampes et des luminaires. Il est important de noter que ces indices ont été définis pour des sources lumineuses relativement ponctuelles situées dans le centre du champ de vision, et non pour des sources étendues illuminant une grande partie du champ de vision, comme c'est le cas des afficheurs des casques caractérisés dans cette étude. Les indices normalisés de visibilité des effets de la modulation temporelle sont les suivants :

- Pst-Im (indice de visibilité du papillotement normalisé par l'IEC et la NEMA)
- SVM (indice de visibilité de l'effet stroboscopique normalisé par l'IEC et la NEMA)
- FI (flicker index normalisé par l'IESNA)

Pour tous les casques testés, ces trois indices ont des valeurs largement supérieures aux seuils de visibilité définis pour un observateur moyen (Pst-Im=1, SVM = 1, FI = 10%), ce qui indique que les modulations temporelles mesurées sont très probablement détectables par le système neuro-visuel humain, bien que les fréquences de modulation soient supérieures à la fréquence critique de fusion. Le rapport Anses sur les LED de 2019, ainsi que la norme américaine IEEE 1789 indiquent que l'exposition à des lumières modulées au-delà de la fréquence critique de fusion est associée à des effets neurobiologiques et des effets sanitaires comme le déclenchement de maux de tête et de migraine. Selon l'analyse de risques présentée dans la norme IEEE 1789, les caractéristiques de modulation temporelle des casques de RV (fréquences 70 HZ à 90 Hz avec un taux de modulation 100%) correspondent à un niveau de risque sanitaire "moyen", "sérieux" ou "élevé". Cependant, cette analyse de risque est applicable aux LED de haute intensité utilisés en éclairage et son applicabilité aux écrans n'a pas été étudiée.

L'effet visuel de « phantom array » fait actuellement l'objet de recherches et on ne dispose encore d'aucun indice pour caractériser la visibilité de cet effet qui se manifeste par l'apparition d'images multiples d'une source de lumière modulée pendant une saccade visuelle.

Les mesures complémentaires réalisées sur des casques avec des séquences d'images non stationnaires et non uniformes, issus de flux vidéo typiques (jeux et animations) ont confirmé que la modulation temporelle est toujours présente avec les mêmes caractéristiques que dans le cas d'images blanches stationnaires. La modulation temporelle est donc intrinsèquement présente dans tous les cas d'usage des casques testés.

Les mesures réalisées avec des Smartphones munis d'application de RV en 3D permettent d'aboutir à trois conclusions :

- La modulation temporelle de la lumière émise par les écrans des 3 Smartphones testés est faible, voire indétectable.
- Lors d'utilisation des applications de réalité virtuelle en 3D, la modulation temporelle des écrans de deux Smartphones sur les trois testés est très faible. En revanche, l'utilisation d'une application de RV sur le troisième modèle testé augmente la modulation temporelle à un taux de 11% et une fréquence de 60 Hz.
- Les écrans des Smartphones testés, même utilisés avec des applications de RV en 3D, ne présentent aucune des caractéristiques de modulation temporelle mesurées pour les casques de RV.

### **Concernant l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques :**

Les niveaux de champs électromagnétiques ont été mesurés pour les différentes bandes de fréquences d'intérêt, situées entre 9 kHz et 6 GHz. Un scénario de réalité virtuelle est envoyé dans le casque et la mesure est réalisée pendant 30 minutes avec le casque en position statique puis en rotation dynamique afin de simuler le comportement de l'utilisateur et d'activer les capteurs de position et d'orientation.

Les résultats sont identiques pour l'ensemble des neuf casques mesurés avec l'identification de divers signaux rayonnés dans les bandes de fréquences intermédiaires, entre 9 kHz et 30 MHz environ. Ces signaux correspondent à des champs électromagnétiques générés par les courants électriques circulant dans les composants, cartes et circuits électroniques intégrés dans les casques (processeur, écran, capteurs, etc.).

Les niveaux mesurés sont très largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

Conformément à la recommandation européenne 199/519/CE ces résultats en niveaux de champs électrique ou magnétique permettent de valider le respect des valeurs limites d'exposition par rapport aux restrictions de base et il n'est ainsi pas nécessaire de réaliser des mesures complexes de densité de courant ou débit d'absorption spécifique dans les bandes de fréquences intermédiaires.