

Etude et réalisation du préamplificateur de signaux ELF-VLF « DARJEELING V2.1 » d'après le schéma proposé par Jean-Louis, F6AGR

Schéma initial du préamplificateur:

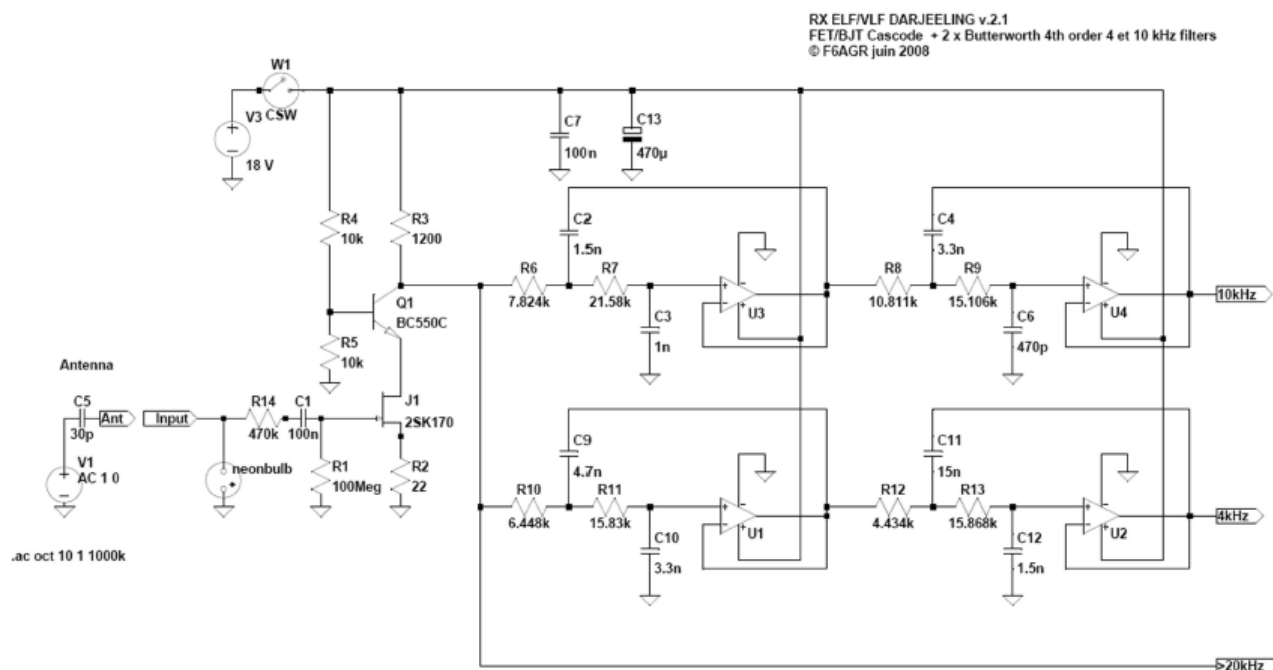
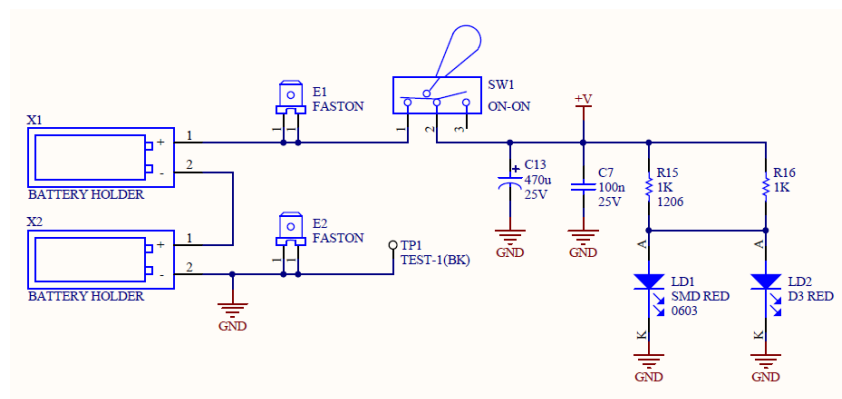
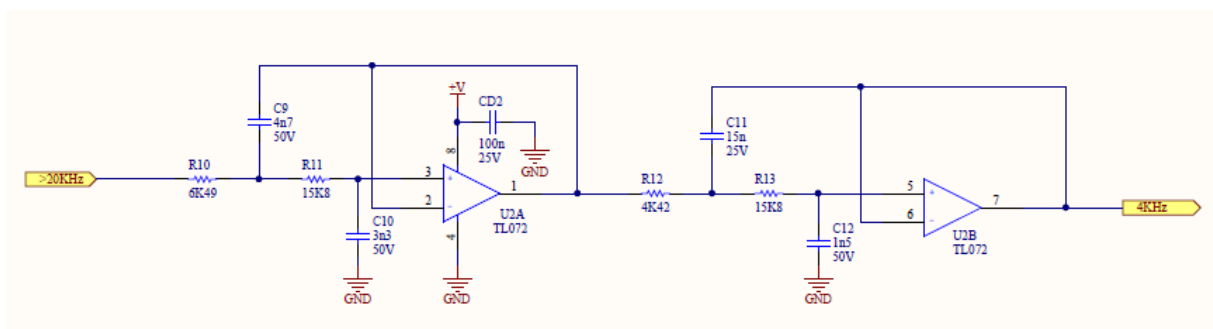
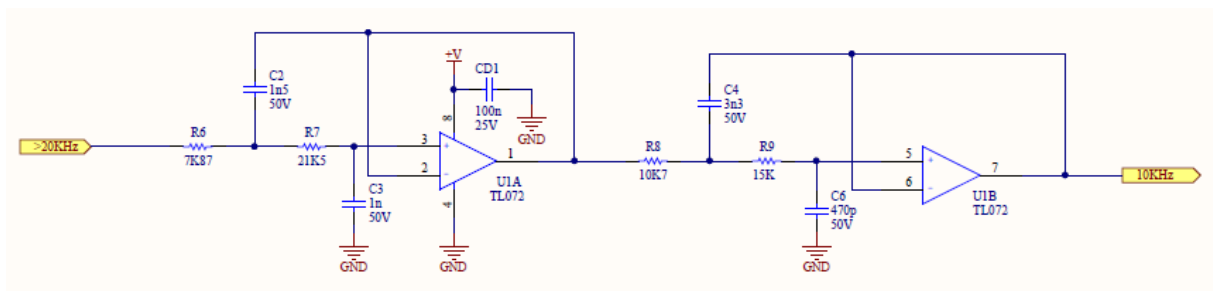
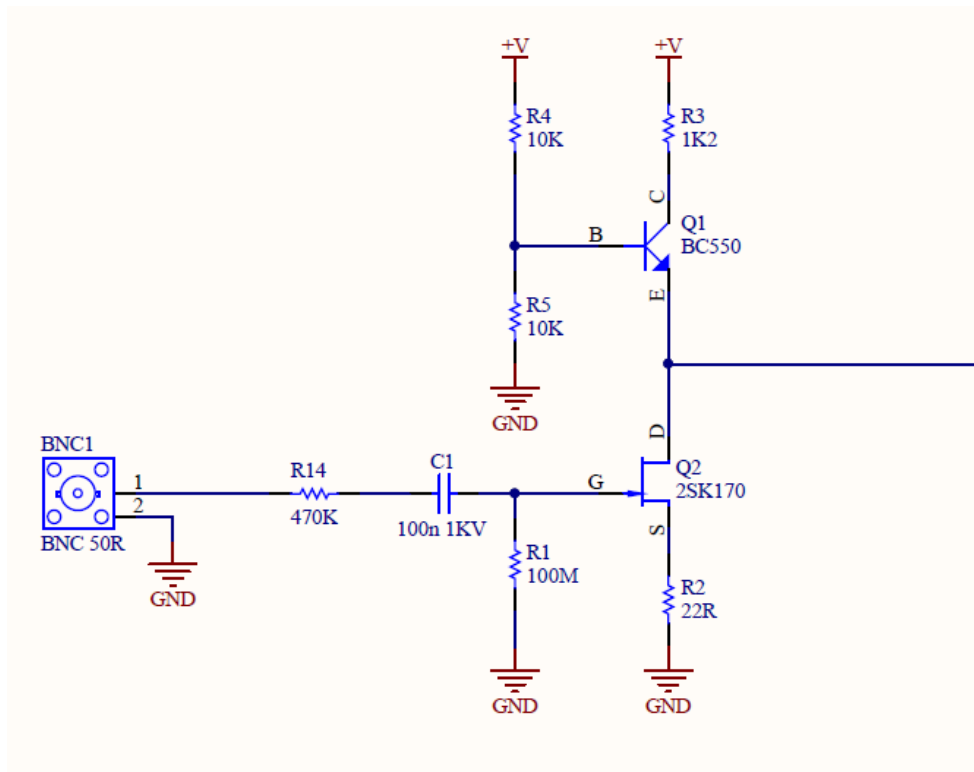
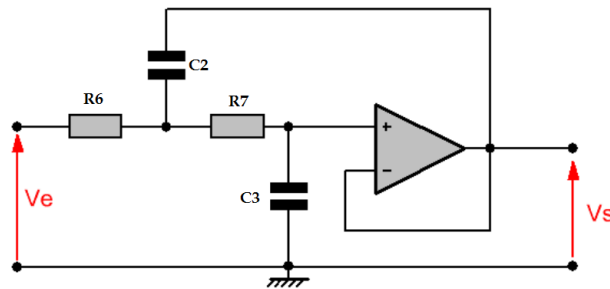


Schéma du préamplificateur réalisé (valeurs de composants normalisés):





Ce circuit utilise 2 circuits composés de 2 filtres passe bas 2^{ème} ordre à structure de Sallen & Key soit un filtrage de 4^{ème} ordre pour chaque sortie (deux pour le filtrage 10KHz et deux pour le filtrage 4 KHz)



La fonction de transfert de ce filtre est :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + C_3(R_6 + R_7)j\omega + R_6R_7C_2C_3(j\omega)^2}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_6R_7C_2C_3}}$$

$$m = \frac{1}{2Q_s} \text{ (coefficient d'amortissement du circuit)}$$

$$m = \frac{C_3(R_6 + R_7)}{2\sqrt{R_6R_7C_2C_3}}$$

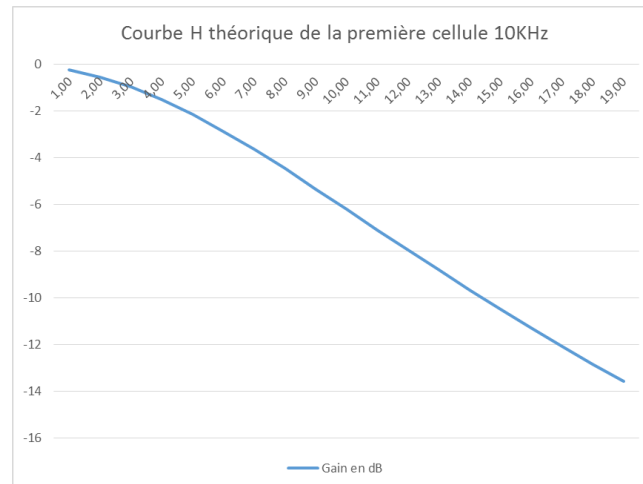
Calculs des fréquences de coupures (Schéma initial et schéma implanté) :

Valeurs théoriques				Valeurs implantées sur la carte			
Filtre passe bas 10 KHz cellule 1				Filtre passe bas 10 KHz cellule 2			
KΩ et nF		KΩ et nF		KΩ et nF		KΩ et nF	
R6	7,824	R8	10,811	R6	7,87	R8	10,7
R7	21,58	R9	15,106	R7	21,5	R9	15
C2	1,5	C4	3,3	C2	1,5	C4	3,3
C3	1	C6	0,47	C3	1	C6	0,47
Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):	
10,0008		10,0002		9,9901		10,0873	

Filtre passe bas 4 KHz cellule 1				Filtre passe bas 4 KHz cellule 2			
KΩ et nF		KΩ et nF		KΩ et nF		KΩ et nF	
R6	6,448	R8	4,434	R6	6,49	R8	4,42
R7	15,83	R9	15,868	R7	15,8	R9	15,8
C2	4,7	C4	15	C2	4,7	C4	15
C3	3,3	C6	1,5	C3	3,3	C6	1,5
Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):		Fréquence de coupure (KHz):	
4,0000		4,0001		3,9908		4,0150	

Tracé de la fonction de transfert théorique de la première cellule de filtrage sur la ligne de filtrage 10KHz (sous Excel)

fréquences (KHz)	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00
ω	12566,36	18849,54	25132,72	31415,9	37699,08	43982,26	50265,44	56548,62	62831,8	69114,98	75398,16	81681,34	87964,52	94247,7	100530,88	106814,06	113097,24	119380,42	125663,6
ω^2	157913403,6	355305158	631653614,6	9,9E+08	1421220633	1934439195	2526614458	3197746424	3947835091	4776880460	5684882531	6671841304	7737756779	8882628955	1,0106E+10	1,1409E+10	1,2791E+10	1,4252E+10	1,5791E+10
A	0,960006397	0,91001439	0,840025386	0,75004	0,64005757	0,510076358	0,36010235	0,190129531	0,00015992	-0,2080055	-0,43978972	-0,68972914	-0,95968657	-1,24964019	-1,55959862	-1,88953785	-2,23948188	-2,60942271	-2,99936034
B	0,369501249	0,55425187	0,739002499	0,92375	1,10850375	1,293254373	1,478005	1,662755622	1,84750625	2,03225687	2,2170075	2,40175812	2,58650875	2,77125937	2,95601	3,14076062	3,32551124	3,51026187	3,69501249
Module	1,028661001	1,06551459	1,11882424	1,18991	1,28002119	1,390211065	1,52124044	1,673590601	1,84750625	2,04305819	2,26020345	2,49883357	2,75880876	3,03998012	3,34220257	3,6653418	4,00927726	4,37390075	4,75912595
H	0,972137564	0,93851367	0,893795437	0,84004	0,78123707	0,719315236	0,65735828	0,597517696	0,54127016	0,48946232	0,44243805	0,40018672	0,36247529	0,32894952	0,29920389	0,27282585	0,24942151	0,22862877	0,21012262
dB	-0,2454455	-0,55118799	-0,975237338	-1,5103	-2,1443432	-2,861614816	-3,64395723	-4,472984562	-5,33171834	-6,20561472	-7,08295068	-7,95474662	-8,81443194	-9,65741486	-10,4806554	-11,2822896	-12,0613218	-12,8173825	-13,550544



Photographies du préamplificateur ELF/VLF réalisé :



Simulations d'une puis deux cellules de filtrage structure de Sallen & Key avec le logiciel de CAO LTSpice.

L'objectif de cette étape est de regarder quelle est l'influence de la résistance de sortie du montage à transistor (environ R_3) ainsi que l'influence des deux lignes de filtrage mises en parallèles.

Pour réaliser ces simulations nous avons dans un premier temps simulé le fonctionnement d'une seule cellule passe bas avec un générateur sinusoïdal parfait et dans un deuxième temps nous avons réalisés les mêmes simulations avec un générateur ayant une résistance interne de 1K Ω .

Les simulations ont été réalisées à la fréquence de coupure de 10 KHz correspondant à la fréquence ou nous avions préalablement une incertitude du fait de nos mesures (en condition réelles).

En résumé : la simulation nous a montré que l'impédance de sortie du montage à transistors n'avait qu'une faible influence sur le gain en sortie, que les fréquences de coupures étaient bien respectées même dans le cas de l'association des deux lignes en parallèles (ligne 4KHz et 10KHz). Nous avons donc pu conclure que la théorie et les simulations sont cohérentes et que nous avons probablement une erreur de mesure ou d'implantation d'un composant sur notre ligne de filtrage 10KHz. Les mesures seront donc une nouvelle fois réalisées.

Schéma de simulation sous LTSpice pour une cellule avec générateur parfait ($R_s=0$) sinusoïdal de fréquence $F=F_c=10\text{KHz}$:

Schéma de simulation pour une cellule avec générateur imparfait ($R_s=1\ 000\ \Omega$) sinusoïdal de fréquence $F=F_c=10\text{KHz}$ avec tension d'offset de 7,6V:

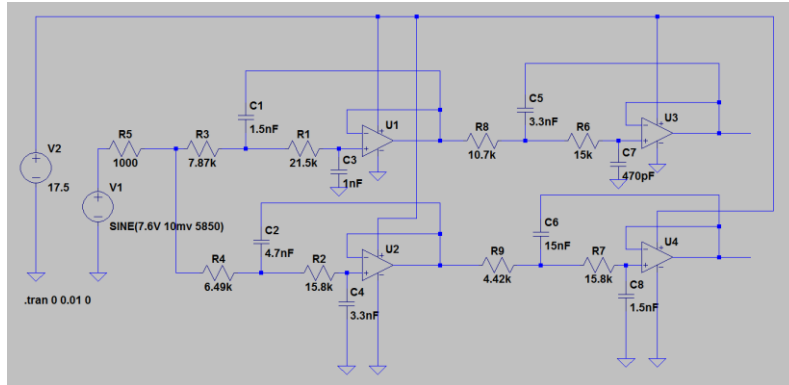
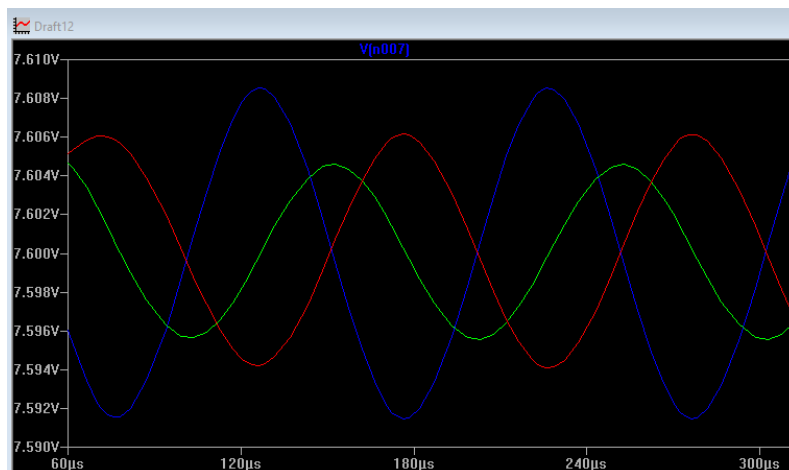


Schéma sur LTSpice



Ligne 10 KHz, bleu 10mV@10KHz, vert sortie du premier filtre, rouge sortie du deuxième filtre

V_{out_max} en sortie (courbe verte étage 1) = 4.569 mV

V_{out_max} en sortie (courbe rouge étage 2) = 6.138 mV

V_{in_max} en entrée (courbe bleu) = 10 mV

Calcul par simulation de l'atténuation de la première cellule de filtrage sur la ligne 10 KHz

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{4.569}{10} = 0.4569$$

Atténuation en tension = $20 \log (0.4569) = -6.8 \text{ dB @10 KHz}$

L'atténuation à la fréquence de coupure d'un filtre actif du deuxième ordre est fonction du coefficient d'amortissement du circuit. Attention car nos mesures ont ensuite été réalisées en cherchant l'atténuation à -3 dB et non celle de la fréquence de coupure.

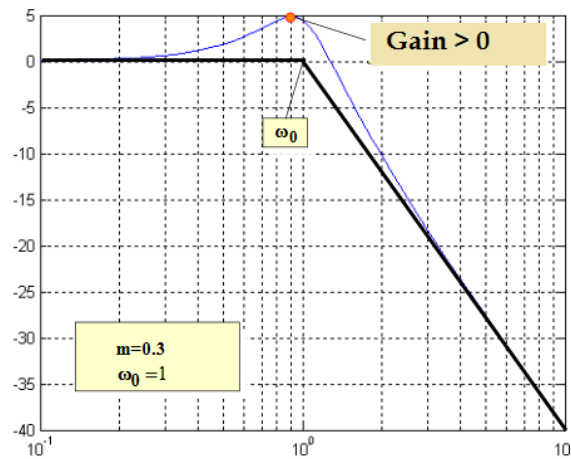
Calcul par simulation de l'atténuation des deux cellules de filtrage sur la ligne 10 KHz

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{6.138}{10} = 0.6138$$

Atténuation en tension = $20 \log (0.6138) = -4.239 \text{ dB @10 KHz}$

La deuxième cellule de filtrage présente donc un gain de +2.561 dB (6.8 – 4.239) qui s'explique par le facteur de forme (coefficient d'amortissement) du deuxième étage de filtrage qui présente un gain positif à la fréquence de coupure.

$$m = \frac{C_6(R_8+R_9)}{2\sqrt{R_8R_9C_4C_6}} = 0.38$$



Recherche de la fréquence de coupure a -3 dB de la première cellule de filtrage (ligne 10KHz)

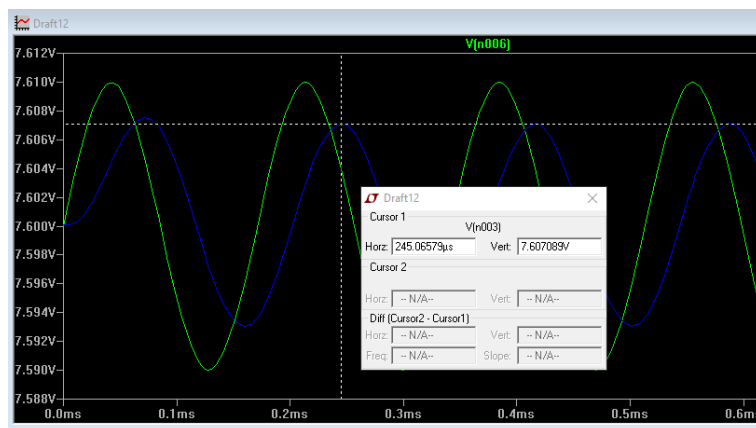
Le coefficient d'amortissement de la première cellule est :

$$m = \frac{C_6(R_8+R_9)}{2\sqrt{R_8R_9C_4C_6}} = 0.92 \quad \text{le filtre présente ici une courbe de transfert continue et}$$

décroissante, une valeur remarquable est $m = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ pour laquelle l'atténuation est de -3 dB pour $\omega = \omega_0$

Afin de trouver la fréquence de coupure à -3 dB de notre filtre (ayant un coefficient $m > 0.707$) nous avons fait varier la fréquence jusqu'à atteindre en sortie une valeur de tension max égale à celle de l'entrée divisée par $\sqrt{2}$

$$\text{Recherche de } \omega_0 \text{ pour } V_{Smax} = \frac{V_{Emax}}{\sqrt{2}}$$



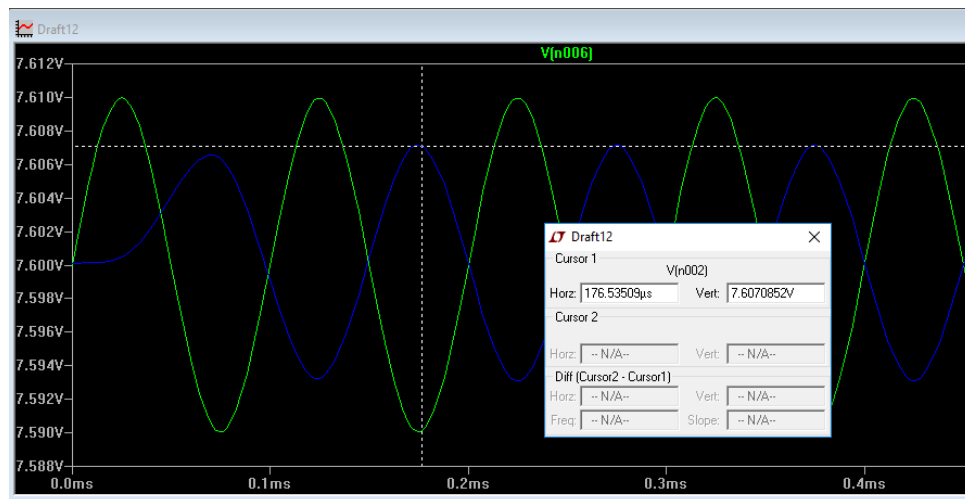
$V_{in}=10 \text{ mV max} / V_{out} = 7.089 \text{ max}$

$A = 7.089/10 = 0.7089$

$G = 20 \text{ Log } (0.7089) = - 2.98 \text{ dB @ } 5,850 \text{ KHz}$ à la sortie de la 1ere cellule de filtrage de la ligne 10 KHz

Recherche de la fréquence de coupure a -3 dB avec les deux cellules de filtrage (ligne 10KHz)

$$\text{Recherche de } \omega_0 \text{ pour } V_{Smax} = \frac{V_{Emax}}{\sqrt{2}}$$

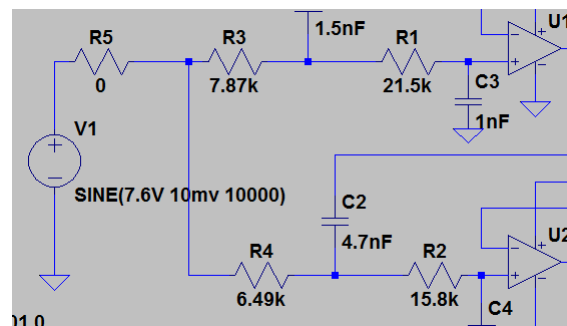


$V_{in}=10 \text{ mV max} / V_{out} = 7.085 \text{ max}$

$A = 7.085/10 = 0.7085$

$G = 20 \text{ Log } (0.7085) = - 2.99 \text{ dB @ } 10 \text{ KHz}$ à la sortie de l'ensemble des deux cellules de filtrage de la ligne 10 KHz

Cette dernière simulation a été réalisée avec une résistance interne de générateur $R_s = R5$ (sur LTSpice) = 0



Recherche de la fréquence de coupure a -3 dB avec les deux cellules de filtrage (ligne 10KHz) avec un générateur sinusoïdal d'amplitude maximale 10mV et de résistance interne 1 KΩ afin de simuler l'influence de la résistance de sortie du montage à transistor sur le gain en sortie .

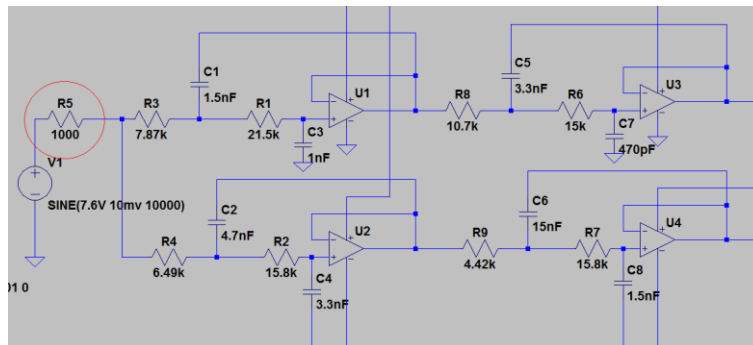
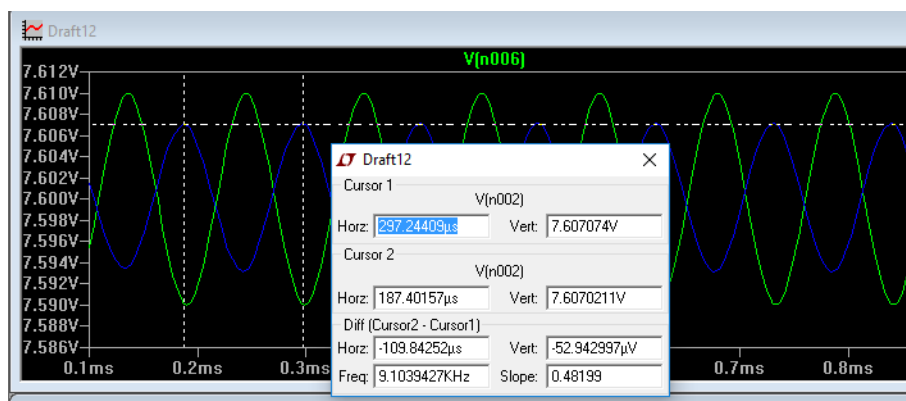


Schéma sous LTSpice avec $R_s=R_5=1K\Omega$

$$\text{Recherche de } \omega_0 \text{ pour } V_{Smax} = \frac{V_{Emax}}{\sqrt{2}}$$



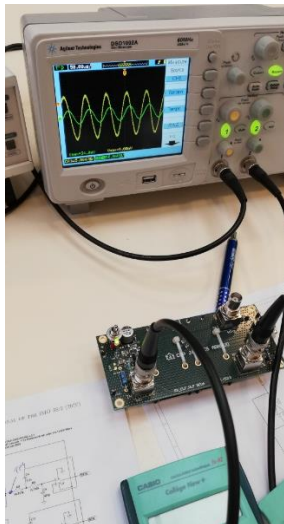
$V_{in}=10 \text{ mV max} / V_{out} = 7.074 \text{ max}$

$A = 7.074/10 = 0.7074$

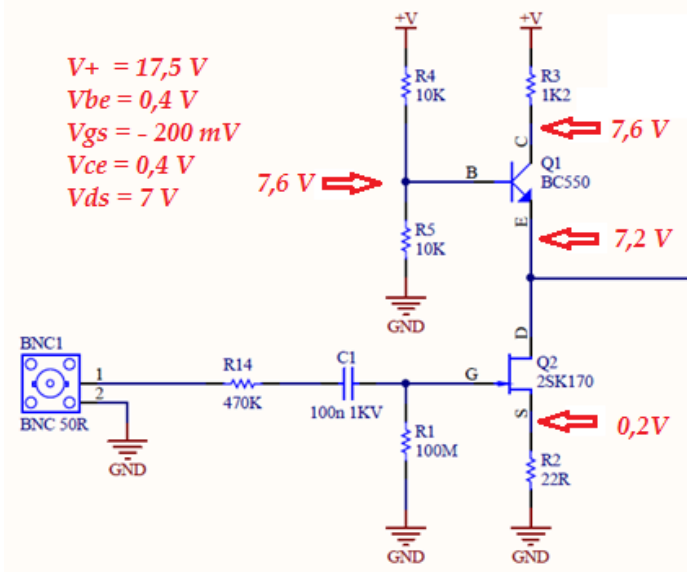
$G = 20 \text{ Log}(0.7074) = -3 \text{ dB @ } 9.1 \text{ KHz}$ à la sortie de l'ensemble des deux cellules de filtrage de la ligne 10 KHz

La résistance de sortie de l'étage à transistor introduit donc une légère diminution de la fréquence de coupure a -3 dB de l'ensemble de la chaîne (sans tenir compte du gain important produit par le montage FET/BJT en amont)

Tests et mesures effectuées sur le circuit réalisé :



Mesure des tensions de polarisation :



Mesures du Gain du préamplificateur ELF-VLF :

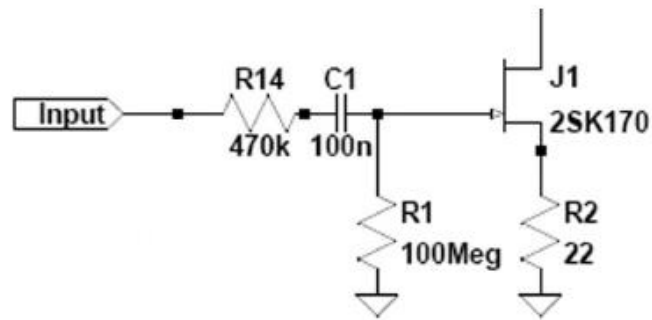
Les mesures réalisées à différentes fréquences ont montrés que nous avons sur les sorties 10KHz et 20 KHz une baisse significative du gain (environ -10 dB par rapport à +25 dB@1KHz). Cette atténuation est fonction de la fréquence d'utilisation et commence à devenir significative au-dessus de 4,5 KHz.

Après quelques mesures réalisées en laboratoire, l'influence de la résistance R14 et de la capacité d'entrée au niveau de la « Gate » du transistor JFET 2SK170 ont été mise en évidence. Le constructeur donne une valeur de 30 pF. Le circuit d'entrée forme un filtre passe bas qui a été dans un premier temps simulé avec le logiciel LTSpice pour différentes fréquences d'entrée et dans un deuxième temps mis en équations afin de tracer la courbe de transfert pour différentes valeurs de R14. La résistance R14 a été mise en place par Jean Louis dans le but de limiter le niveau d'entrée mais nous pouvons nous en passer. Selon Jean-Louis, « La résistance R14 de 470 kΩ n'est pas indispensable. Sa valeur est à ajuster aux essais, en fonction des perturbations éventuelles qui pourraient provenir d'émetteurs de radiodiffusion proches ou puissants. L'idéal est de s'en passer ! »

Electrical Characteristics (Ta = 25°C)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Gate cut-off current	I_{GSS}	$V_{GS} = -30 \text{ V}, V_{DS} = 0$	—	—	-1.0	nA
Gate-drain breakdown voltage	$V_{(BR) GDS}$	$V_{DS} = 0, I_G = -100 \mu\text{A}$	-40	—	—	V
Drain current	I_{DSS} (Note)	$V_{DS} = 10 \text{ V}, V_{GS} = 0$	2.6	—	20	mA
Gate-source cut-off voltage	$V_{GS (OFF)}$	$V_{DS} = 10 \text{ V}, I_D = 0.1 \mu\text{A}$	-0.2	—	-1.5	V
Forward transfer admittance	$ Y_{fs} $	$V_{DS} = 10 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1 \text{ kHz}$	—	22	—	mS
Input capacitance	C_{iss}	$V_{DS} = 10 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	30	—	pF
Reverse transfer capacitance	C_{rss}	$V_{DG} = 10 \text{ V}, I_D = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	6	—	pF
Noise figure	NF (1)	$V_{DS} = 10 \text{ V}, I_D = 1.0 \text{ mA}, R_G = 1 \text{ k}\Omega, f = 1 \text{ kHz}$	—	1.0	10	dB
	NF (2)	$V_{DS} = 10 \text{ V}, I_D = 1.0 \text{ mA}, R_G = 1 \text{ k}\Omega, f = 1 \text{ kHz}$	—	0.5	2	

Note: I_{DSS} classification GR: 2.6~6.5 mA, BL: 6.0~12 mA, V: 10~20 mA



Circuit d'entrée du préamplificateur ELF/VLF

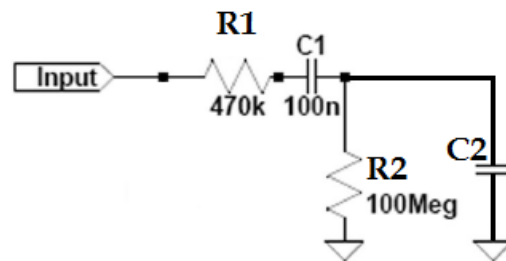


Schéma équivalent utilisé pour les calculs (C2=30 PF)

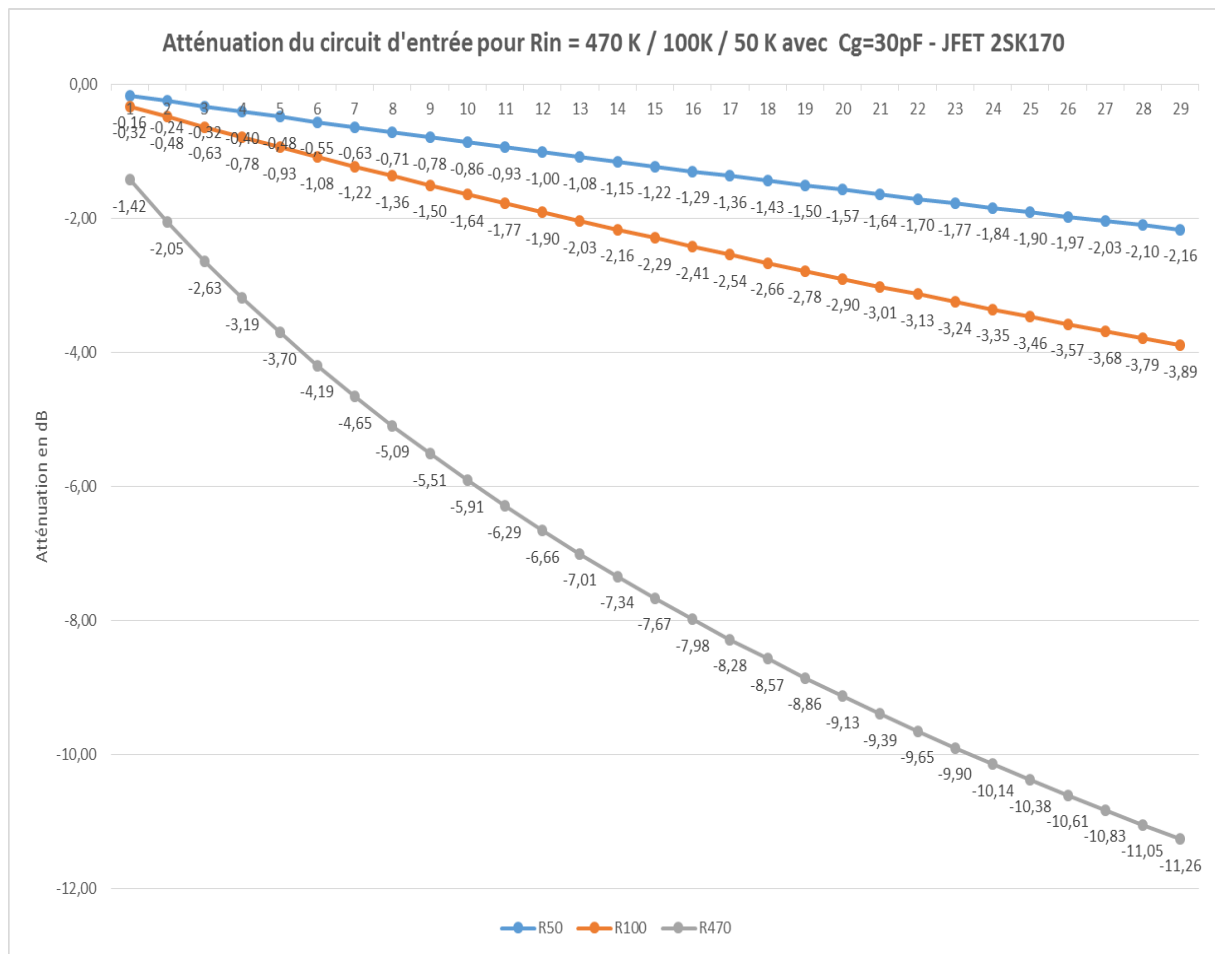
$$Z_1 = R_1 + Z_{C1}$$

$$Z_2 = R_2 // Z_{C2}$$

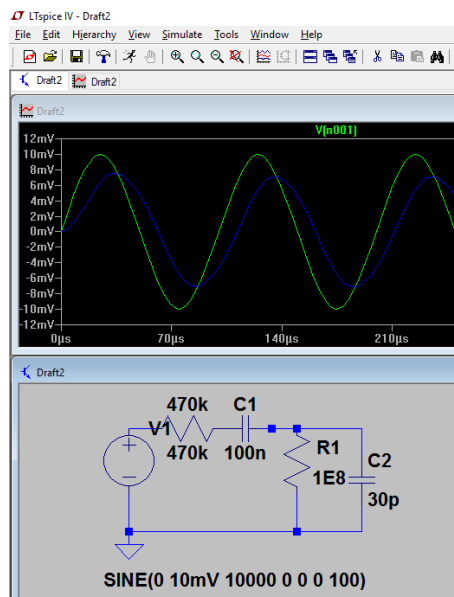
$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + \frac{1}{C_1^2 \omega^2}}$$

$$Z_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{C_2^2 \omega^2}}}$$

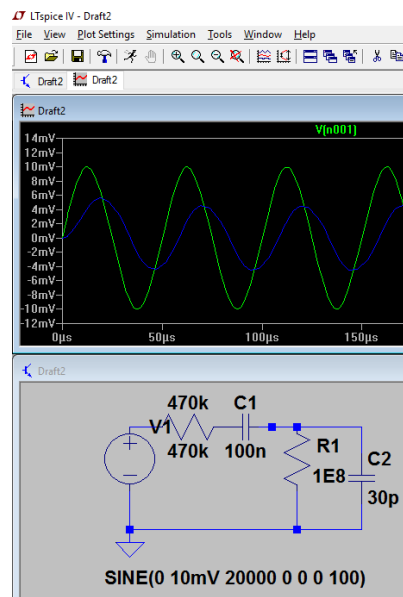
$$T = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{avec} \quad \omega = 2\pi f$$



Tracé de la courbe T (dB) en fonction de la fréquence en KHz et résistance d'entrée R_4 ou R_1 sur notre schéma équivalent sous EXCEL



*Simulation LTSpice à 10 KHz
Entrée en vert et sortie en bleu*



*Simulation LTSpice à 20 KHz
Entrée en vert et sortie en bleu*

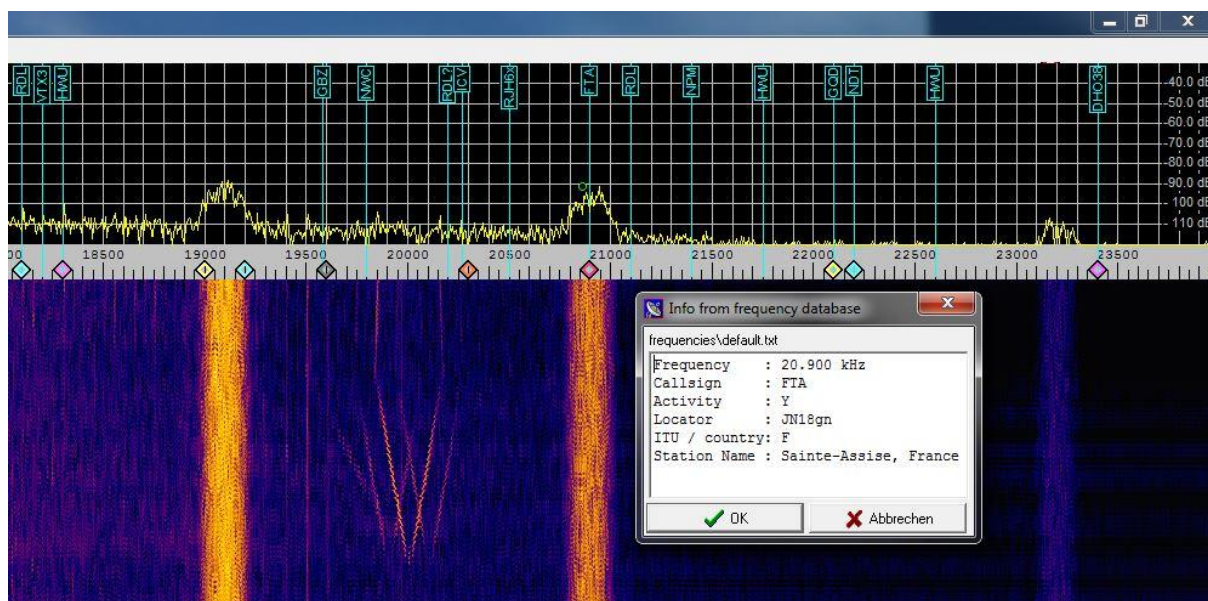
Mesures du Gain pour l'ensemble du préamplificateur entre l'entrée BNC et la sortie 4 KHz :

Les appareils utilisés sont :

- Générateur de fréquence Centrad GF266
- Oscilloscope Agilent Technologie DSO 1002A (60 MHz)

Fréquence de mesure	Tension d'entrée max	Forme du signal	tension max de sortie BNC 4 KHz	Amplification	Gain en tension (dB)
1KHz	4 mV	Sinus	110 mV	27,5	28,79
3,722 KHz	4 mV	Sinus	77,28 mv	19,32	25,72

Premiers essais réalisés avec le logiciel Spectrum Lab :

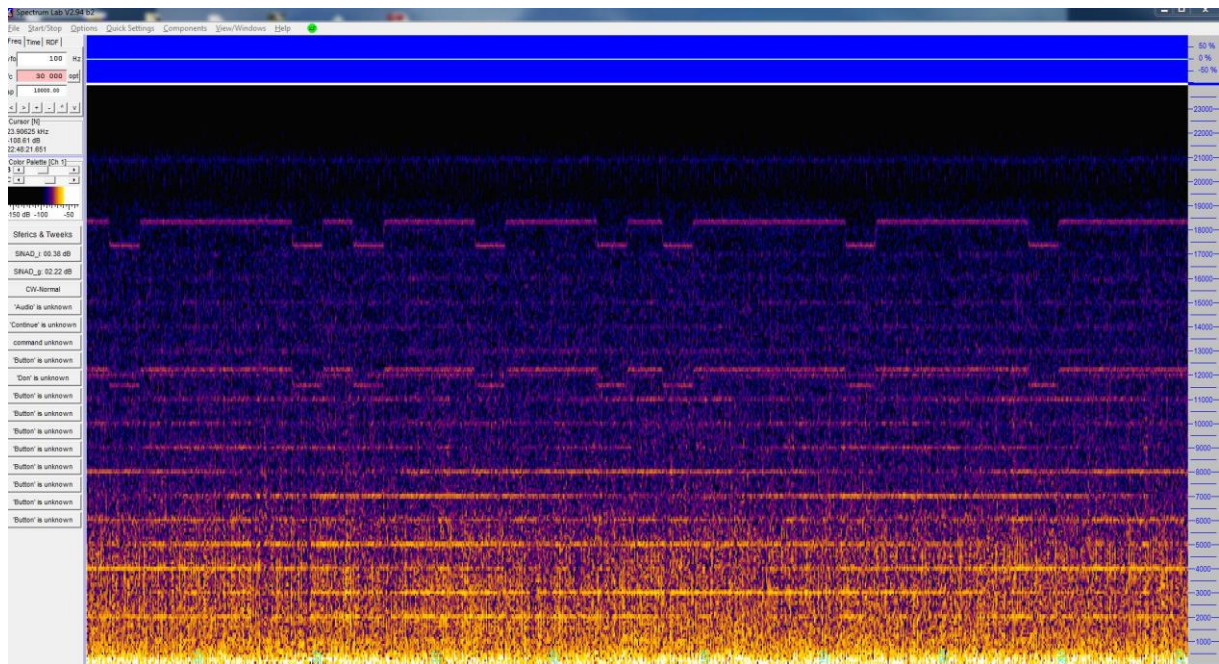


FTA: L'émetteur de Sainte Assise est un émetteur pour les ondes très longues VLF (very low frequency), installé dans le domaine du château de Sainte-Assise à Seine-Port en Seine-et-Marne, qui appartenait à la Compagnie Radio France filiale de la Compagnie générale de la télégraphie sans fil (CSF). Son antenne était portée par onze pylônes de 250 mètres et cinq mats de 180 mètres. À son inauguration en 1921, l'émetteur était le plus puissant au monde et couvrait le monde entier.

En novembre 1921, y fut réalisé à titre expérimental la première émission radiophonique française au moyen d'un émetteur grandes ondes de 1 kW. Mademoiselle Yvonne Brothier interpréta La Marseillaise, La Valse de Mireille et un air du Barbier de Séville. Par la suite, le site a été un centre d'expérimentation pour la télévision.

Réquisitionné par la Kriegsmarine en 19417 pour permettre les communications entre Berlin et les U-Boots. aradoxalement, Sainte-Assise n'a pas souffert des bombardements alliés et toutes les antennes ont survécu. Comme prévu par la convention d'octobre 1920, le 1er janvier 1954, les PTT reprirent ces installations⁸.

En 1991, une partie de la station est vendue par France Télécom à la Marine nationale, pour devenir le Centre de transmissions marine (CTM) de Sainte-Assise chargé des communications unilatérales avec les sous-marins en plongée. Le site, inauguré en 1998, est devenu un terrain militaire surveillé par une compagnie de fusiliers-marins.



Littérature sur le sujet des ELF-VLF :

Searching for meteor ELF /VLF signatures lien:

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00638548/document>

*Evidence for VLF radio waves propagation perturbations associated with single meteors Jean-L. Rault
International Meteor Organization Radio Commission :*

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00638549/file/Poster_M-SID_Jean-L_Rault_s.pdf

ELF/VLF radiation produced by the 1999 Leonid meteors

https://www.researchgate.net/publication/225202936_ELFVLF_radiation_produced_by_the_1999_Leonid_meteors

Site internet sur les VLF

<http://www.vlf.it/>

SAQ Grimeton (Suède)

<https://alexander.n.se/>

Logiciels utiles :

SpectrumLab

<https://www.qsl.net/dl4yhf/spectra1.html>

Logiciel SAQ

<https://sites.google.com/site/swljo30tb/>