

PROJET Energies Renouvelables Marines

Bilan des mesures de bruit de l'hydrolienne Sabella

Mesures acoustiques dans l'estuaire de l'Odet

établi le : 6 mars 2009	par : Y. Le Gall	Réf : NSE/AS-08/291	n° analytique : E021004	Programme / Projet : PGE02 / PJE0210
----------------------------	---------------------	------------------------	----------------------------	---

1. Contexte

Afin de tenter de déterminer l'impact sonore potentiel d'une hydrolienne sur la faune marine, deux séries de mesures de bruits ont été effectuées en 2008. En avril, ces acquisitions ont été réalisées en présence de Sabella ; en octobre, sans l'hydrolienne. La gamme fréquentielle de mesures est très large bande ([0, 100 kHz]) pour couvrir les spectres audibles des poissons et des mammifères marins.

Ce document présente dans un premier temps les deux configurations expérimentales, l'origine possible des différents bruits mesurés, les mesures effectuées et leur domaine de validité. Les résultats sont exposés selon les trois gammes de fréquences différentes, HF (Haute Fréquence), TBF (Très Basse Fréquence) et UBF (Ultra Basse Fréquence), en comparant systématiquement les données acquises en présence et en l'absence de l'équipement.

2. Configurations expérimentales et mesures effectuées

2.1. Première expérimentation en présence de l'hydrolienne (22 avril 2008)

Deux hydrophones identiques, de type B&K 8101 préamplifiés, sont déployés à 100 mètres de l'hydrolienne dans l'axe de la turbine (chenal de l'Odet) et à 15 m de l'hydrolienne sur la pente (Fig. 1). Les hydrophones ont été préalablement calibrés en cuve acoustique ($S_h = -184$ dB réf. 1 V/ μ Pa).

Les mesures de bruit s'effectuent à partir d'un analyseur HP 89410A. Les mesures sont réalisées dans trois gammes de fréquences différentes : HF ([0, 100 kHz]), BF ([0, 5 kHz]) et TBF ([0, 500 Hz]). A chaque gamme de fréquence correspond une résolution particulière : HF (62.5 Hz), BF (3.125 Hz) et TBF (0.3125 Hz).

Chaque mesure présentée est une moyenne effectuée sur 20 acquisitions. La récurrence d'acquisition est de 30 minutes, entre 10h00 et 18h30, avec une absence de données à 11h00 et 11h30, en raison d'un problème technique.

Le 22 avril 2008, les coefficients de marée sont de 82 le matin et de 80 l'après-midi (Tableau 1)

Date		AVRIL 2008					
		Matin			Après-midi		
		Coeff.	Pleine mer	Basse mer	Coeff.	Pleine mer	Basse mer
mar	22	82	6h32	0h36	80	18h47	12h50

Tableau 1 : horaires et coefficients de marée du 22 avril 2008

L'acquisition des données de bruit est réalisée à partir d'une vedette légère au mouillage (Fig. 1). A bord de cette vedette, se trouvent : un groupe électrogène, l'analyseur de spectres, l'alimentation des préamplificateurs, un PC de sauvegarde et de traitement, et les deux tourets de câble hydrophonique faible bruit (100 m pour l'hydrophone #1 ; 60 m pour l'hydrophone #2).

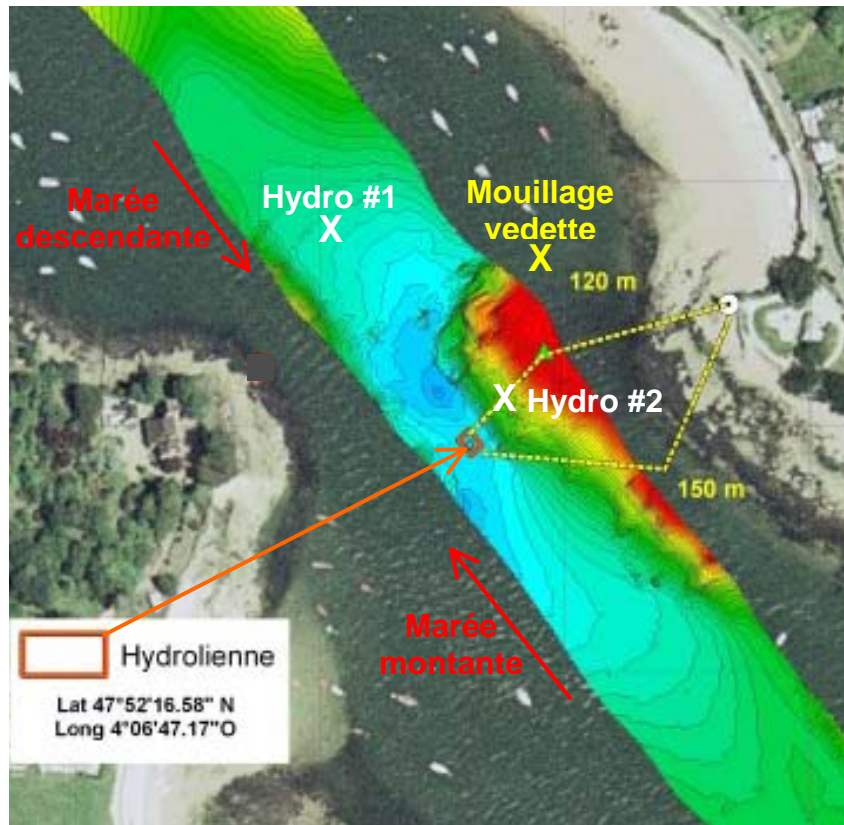


Fig. 1 : Estuaire de l'Odet – Localisation de l'hydrolienne – Implantation des hydrophones

2.2. Seconde expérimentation en l'absence de l'hydrolienne (2 & 3 octobre 2008)

Suite au dépouillement des données de la première expérimentation, qui indiquait une tendance de bruits liés à l'hydrolienne dans la gamme infrasonore, il a été décidé de ne déployer qu'un seul hydrophone, à une position proche de celle de l'hydrophone #1 (chenal de l'Odet).

Les mesures sont réalisées dans trois gammes de fréquences différentes : HF ([0, 100 kHz]), TBF ([0, 500 Hz]) et UBF ([0, 50 Hz]). A chaque gamme de fréquence correspond une résolution particulière : HF (62.5 Hz), TBF (0.3125 Hz) et UBF (0.03125 Hz). Les mesures présentées dans les gammes HF et TBF sont issues d'une moyenne effectuée sur 20 acquisitions, et celles de la gamme UBF d'une moyenne effectuée sur 5 acquisitions (temps d'acquisition beaucoup plus long dans cette gamme). La récurrence d'acquisition est de 30 minutes, entre 14h00 et 18h30 le jeudi 2 octobre (coefficient de marée de 83), et entre 7h30 et 12h00 le vendredi 3 octobre (coefficient de marée de 78) (Tableau 2).

OCTOBRE 2008							
Date		Matin			Après-midi		
		Coef.	Pleine mer	Basse mer	Coef.	Pleine mer	Basse mer
mer	1	94	6h31	0h34	91	18h45	12h48
jeu	2	87	7h00	1h07	83	19h14	13h21
ven	3	78	7h30	1h39	73	19h44	13h55

Tableau 2 : horaires et coefficients de marée du 1^{er} au 3 octobre 2008

2.3. Remarque sur les différences mer descendante / mer montante

Pendant les acquisitions, à un ΔT identique de l'heure de l'étale, les états de mer et les niveaux de bruit sont différents (en basse fréquence) le matin (mer descendante) et l'après-midi (mer montante).

2.4. Remarque sur les unités utilisées dans ce document

- *Pression de référence en ASM* : $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa en acoustique aérienne)
- *Analyse spectrale* : densité spectrale de puissance *unité* = $\text{dB } V_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$
 ⇒ Dépendant des caractéristiques de l'hydrophone et du préampli utilisés
- *Niveau de bruit* = densité spectrale de puissance – $(\text{Sh}+\text{G})_{\text{hydrophone}}$
 ⇒ Niveau absolu *unité* = $\text{dB } \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$

2.5. Remarque sur le domaine de validité des mesures

Par rapport à l'analyseur de spectres utilisé, et au traitement interne effectué, les mesures ne sont pas exploitables en ultra basse fréquence (UBF), du fait de la résolution utilisée. On estime que la fréquence la plus basse exploitable est égale à 4 fois la résolution de la mesure, soit 250 Hz pour la gamme HF, 12.5 Hz pour la gamme BF, 1.25 Hz pour la gamme TBF et 0.125 Hz pour la gamme UHF.

D'autre part, la mesure de l'amplitude d'une source de bruit ne sera correcte que si l'hydrophone utilisé est placé en champ lointain (au sens de la longueur d'onde). On admet classiquement (source : S. Gautard - DCNS) que la distance minimale entre le capteur et la source doit être supérieure à $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde dans l'eau. Pour une distance de 100 m, l'analyse en amplitude sera donc correcte pour des fréquences supérieures à ~ 7.5 Hz (~ 50 Hz pour une distance de 15 m). Il convient donc d'être prudent sur les amplitude mesurées dans la gamme UBF, pour des fréquences inférieures à 7 Hz. De même, dans cette gamme, la correction des pertes par divergence sphérique, de façon à se ramener à un niveau de bruit au voisinage de l'hydrolienne, ne pourra absolument pas être appliquée.

2.6. Remarque sur les bruits mesurés

Les bruits mesurés et présentés dans ce document représentent la sommation du bruit ambiant présent au niveau de la zone d'implantation de l'hydrophone, du bruit électrique de la chaîne d'acquisition (groupe électrogène + alimentation des préamplificateurs + analyseur), du bruit d'écoulement le long de l'hydrophone, et du bruit éventuel provenant de l'hydrolienne Sabella.

Bruit ambiant et bruit d'écoulement seront élevés en basse fréquence. Le bruit électrique est, quant à lui, haute fréquence.

Les bruits générés par l'hydrolienne peuvent être d'origines différentes :

- écoulement tourbillonnaire (obstruction de l'écoulement par la structure),
- vibration de la structure ou d'éléments de la structure lié à l'écoulement,
- défaut de balourd de la structure (déséquilibre de masse générateur de vibrations),
- passage des pales devant un appendice,
- fouettement de la pale,
- fonctionnement de l'alternateur.

Concernant le type d'écoulement, il dépend du nombre de Reynolds (sans dimension), défini par le produit de la masse volumique du fluide par la vitesse de l'écoulement, et par le diamètre de l'objet à l'origine de l'obstruction, divisé par la viscosité du fluide. Dans notre cas, ce nombre étant très élevé, l'écoulement est instationnaire et se caractérise par un lâcher tourbillonnaire, dont la fréquence est égale au produit d'un nombre sans dimension appelé nombre de Strouhal par la vitesse d'écoulement, divisé par le diamètre de l'objet (tube cylindrique). Dans notre cas, le nombre de Strouhal est de l'ordre de 0.23. Il est donc possible, pour un diamètre de tube de 28 cm, d'estimer la fréquence du lâcher tourbillonnaire, en fonction de la vitesse d'écoulement (Tableau 3).

Vitesse d'écoulement (nœuds)	Fréquence de Strouhal (Hz)
1	0.4
2	0.8
3	1.2
4	1.6

Tableau 3 : Fréquence du lâcher tourbillonnaire en fonction de la vitesse d'écoulement (Tube de 28 cm de diamètre)

Concernant le bruit des pales, les raies émises sont harmoniques de la fréquence de passage des pales : $f = n.N.v$, n étant le rang de l'harmonique, N le nombre de pales, et v le régime de rotation (en Hz). L'hydrolienne Sabella ayant 6 pales, il est possible de calculer les fréquences du fondamental, appelé BR1 (BR = Blade Rate), en fonction du régime de rotation (Tableau 4).

Régime de rotation (tours/min)	BR1 (Hz)
10	1
20	2
30	3
40	4

Tableau 4 : Fréquence de passage des pales (fondamental) en fonction du régime de rotation

En conclusion, bruits d'écoulement turbulent et de passage des pales se situent dans le domaine infrasonore, globalement entre 0.5 et 3 Hz. Il en sera de même pour les vibrations de la structure complète et pour d'éventuels défauts de balourd.

3. Mesures HF

L'intérêt des mesures hautes fréquences (HF) est relatif à l'impact potentiel sur les mammifères marins à dents (odontocètes) dont la sensibilité auditive maximale (seuil à ~ 40 dB réf. $1 \mu\text{Pa}$) est comprise entre 30 et 70 kHz. Les mesures réalisées avec et sans hydrolienne sont présentées dans la bande de fréquences [2, 90 kHz], avec une résolution fréquentielle de 62.5 Hz.

3.1. Sans hydrolienne

Les mesures présentées (Fig. 2) sont celles de vendredi 3 octobre 2008 matin, entre 7h30 et 12h00 (Pleine Mer à 7h30). On constate une relative faible dépendance du cycle de marée, et un niveau de bruit moyen faible ($\sim 60-65$ dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) dans la bande [10, 90 kHz]. La remontée du niveau de bruit au delà de 35 kHz et le pic HF au voisinage de 60 kHz sont d'origine électrique (chaîne d'acquisition).

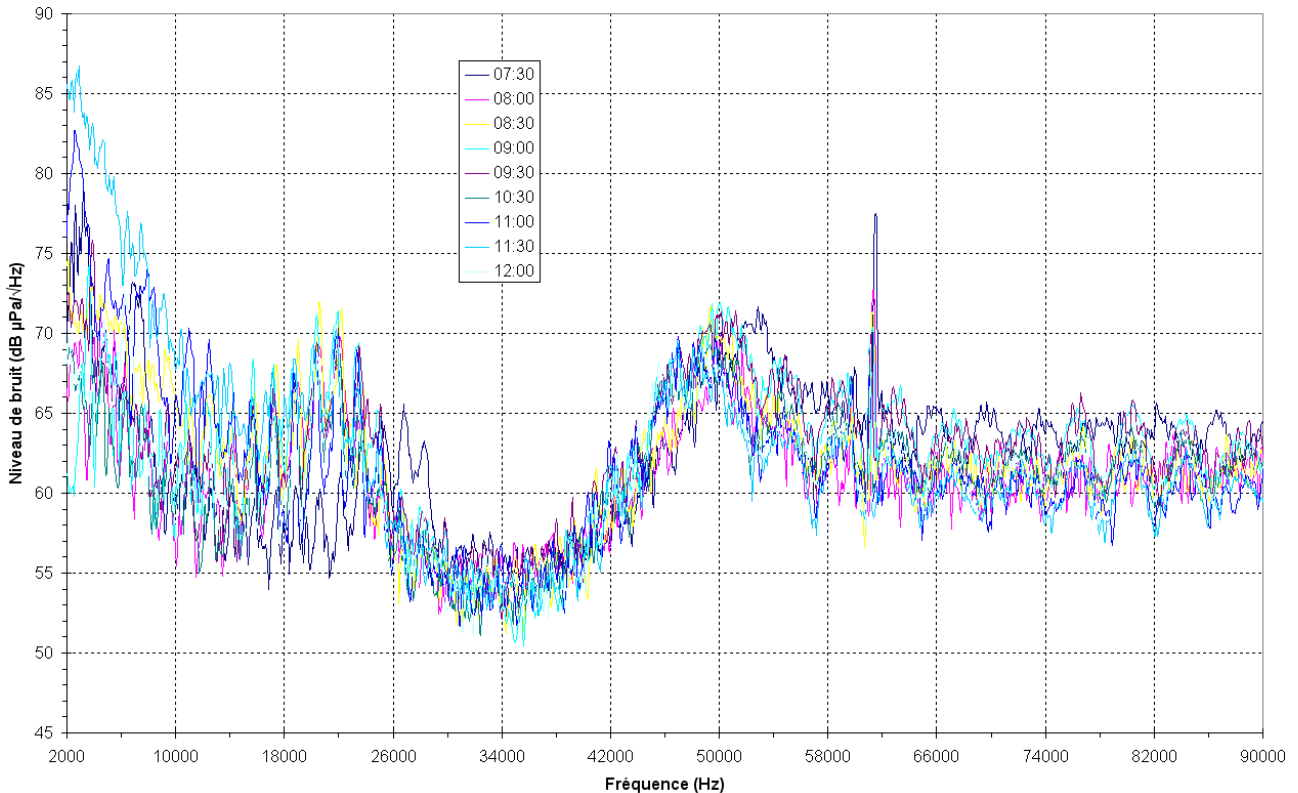


Fig. 2 : niveaux absolus de bruit HF sans hydrolienne

3.2. Avec hydrolienne (hydrophone à 100 m)

Les mesures présentées (Fig. 3) sont celles de mardi 22 avril 2008, entre 10h00 et 18h00 (Pleine Mer à 6h32 et Basse Mer à 12h50). De façon identique aux mesures sans hydrolienne, on ne remarque pas ou peu de dépendance du cycle de marée, et le niveau moyen est comparable ($\sim 60-65$ dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) dans la bande [10, 90 kHz]. Le niveau de bruit remonte également au delà de 35 kHz, sans aucun lien avec la présence de l'hydrolienne (bruit d'origine électrique).

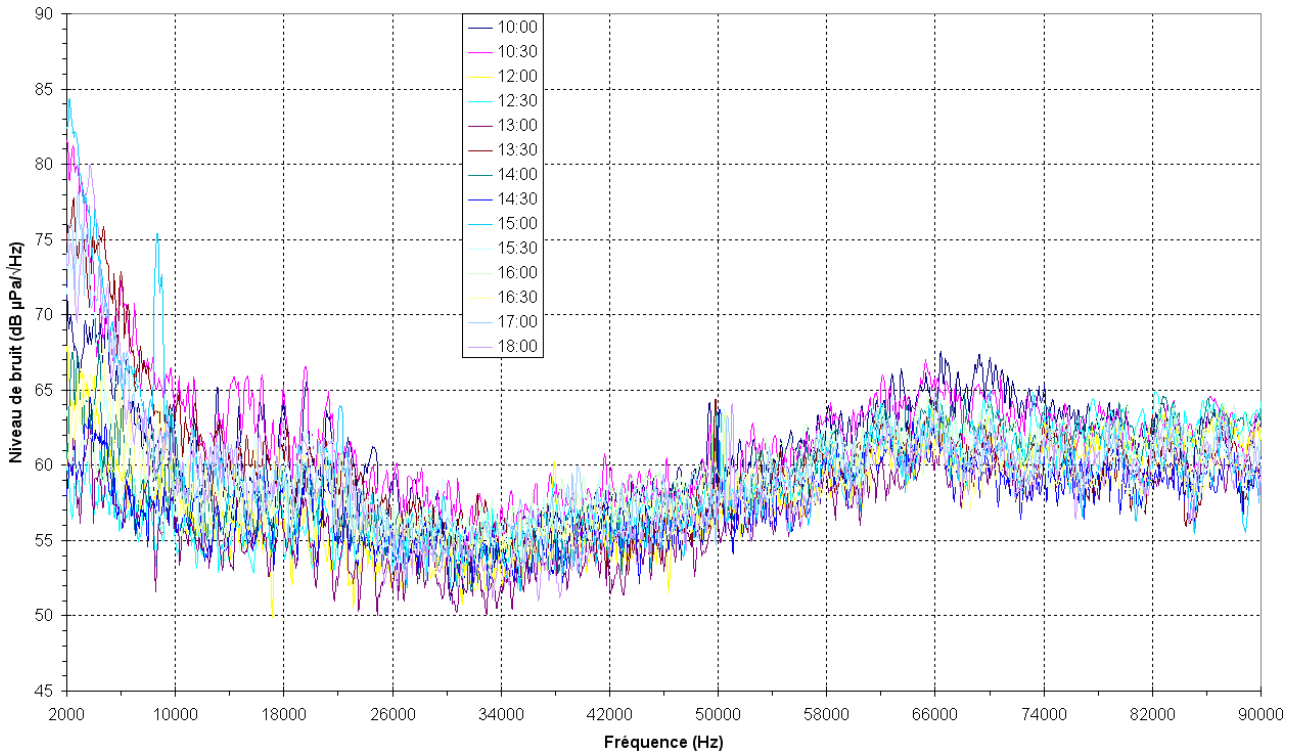


Fig. 3 : niveau absolu de bruit HF avec hydrolienne

3.3. Comparaison Max HF de bruit [2, 90 kHz] avec et sans hydrolienne

La comparaison des niveaux de bruit maximum, mesurés avec et sans hydrolienne (Fig. 4), est intéressante : les deux courbes présentent les mêmes tendances, avec une décroissance régulière et normale de 2 à 35 kHz, puis une remontée d'origine électrique au delà de 35 kHz, les amplitudes étant comparables.

3.4. Conclusions sur les mesures HF

Ces mesures nous permettent de vérifier que **l'hydrolienne ne génère pas de bruits haute fréquence**, susceptibles de perturber les mammifères marins de type odontocètes. Les niveaux absolus mesurés sont très faibles, avec une contribution d'origine électrique provenant de la chaîne d'acquisition, au delà de 35 kHz.

Ces amplitudes nous indiquent que **les bruits mesurés dans l'Estuaire de l'Odet sont perceptibles par les odontocètes, mais sont très éloignés (~90 dB pour les dauphins communs) de leur seuil de gêne.**

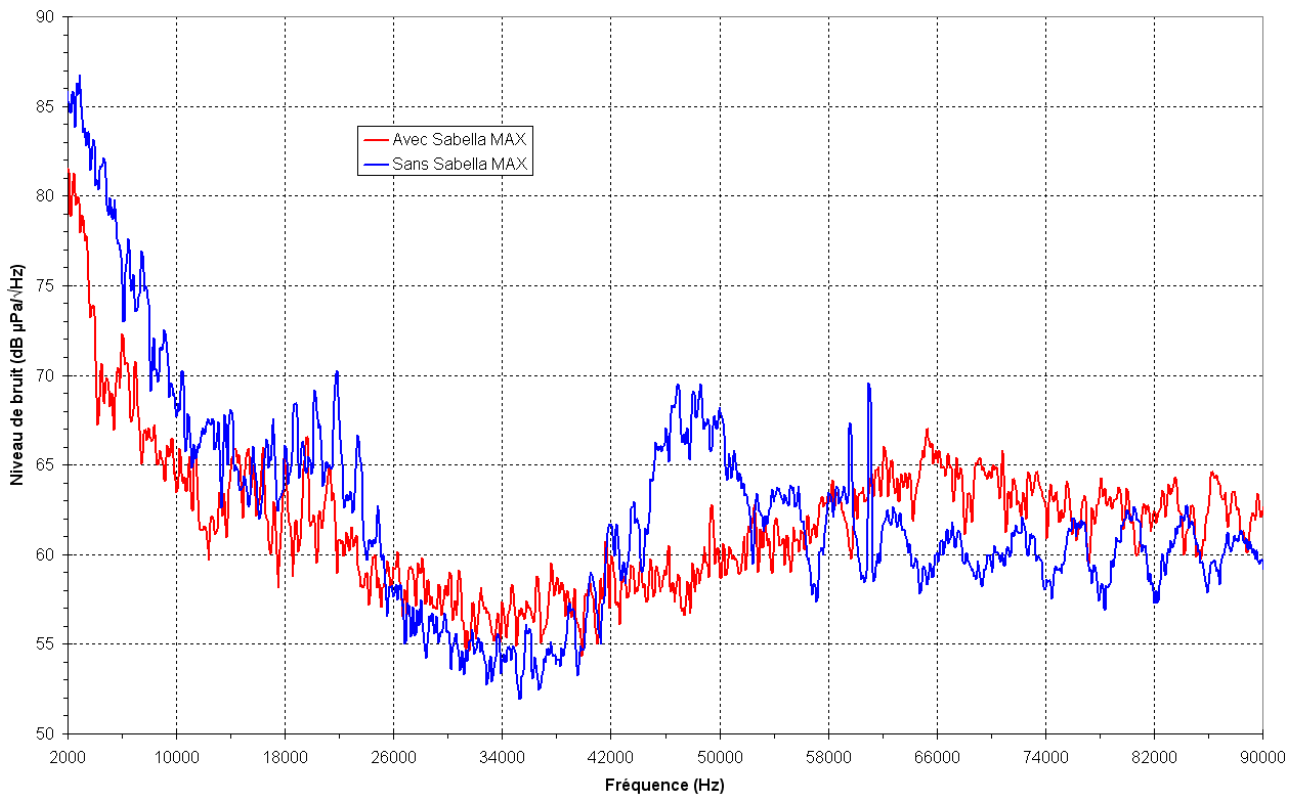


Fig. 4 : niveau absolu maximum de bruit HF avec et sans hydrolienne

4. Mesures TBF

L'intérêt des mesures Très Basse Fréquences (TBF) est relatif à l'impact potentiel sur les poissons dont la sensibilité auditive maximale (seuil à ~ 80-100 dB réf. 1 μPa) est comprise entre 100 et 500 Hz. Les mesures réalisées avec et sans hydrolienne sont présentées dans la bande de fréquences [0, 500 Hz], avec une résolution fréquentielle de 0.3125 Hz.

4.1. Mesures TBF [0, 500 Hz] sans hydrolienne

Les mesures présentées (Fig. 5) sont celles de jeudi 2 octobre après-midi, entre 14h00 et 18h30 (Basse Mer à 13h21). En fin de bande d'analyse ([300, 500 Hz], on ne remarque pas de forte dépendance du cycle de marée. Par contre, pour des fréquences inférieures à 200 Hz, plus le courant est élevé, plus le niveau de bruit mesuré est fort. La figure 6 présente le minimum et le maximum de bruit TBF sans hydrolienne : entre 400 et 500 Hz, les deux courbes sont très voisines ; pour les fréquences plus basses, l'écart se creuse. **Les variations du niveau de bruit total mesuré en fonction du cycle de marée sont observables pour des très basses fréquences, inférieures à 200-300 Hz.**

Les raies observées à 100, 200, 300 et 400 Hz, visibles sur la courbe de minimum de bruit (Fig. 6), proviennent du groupe électrogène.

En présence de courant maximum, et pour des fréquences inférieures à 30 Hz, le niveau de bruit total mesuré dépasse la valeur de 100 dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$.

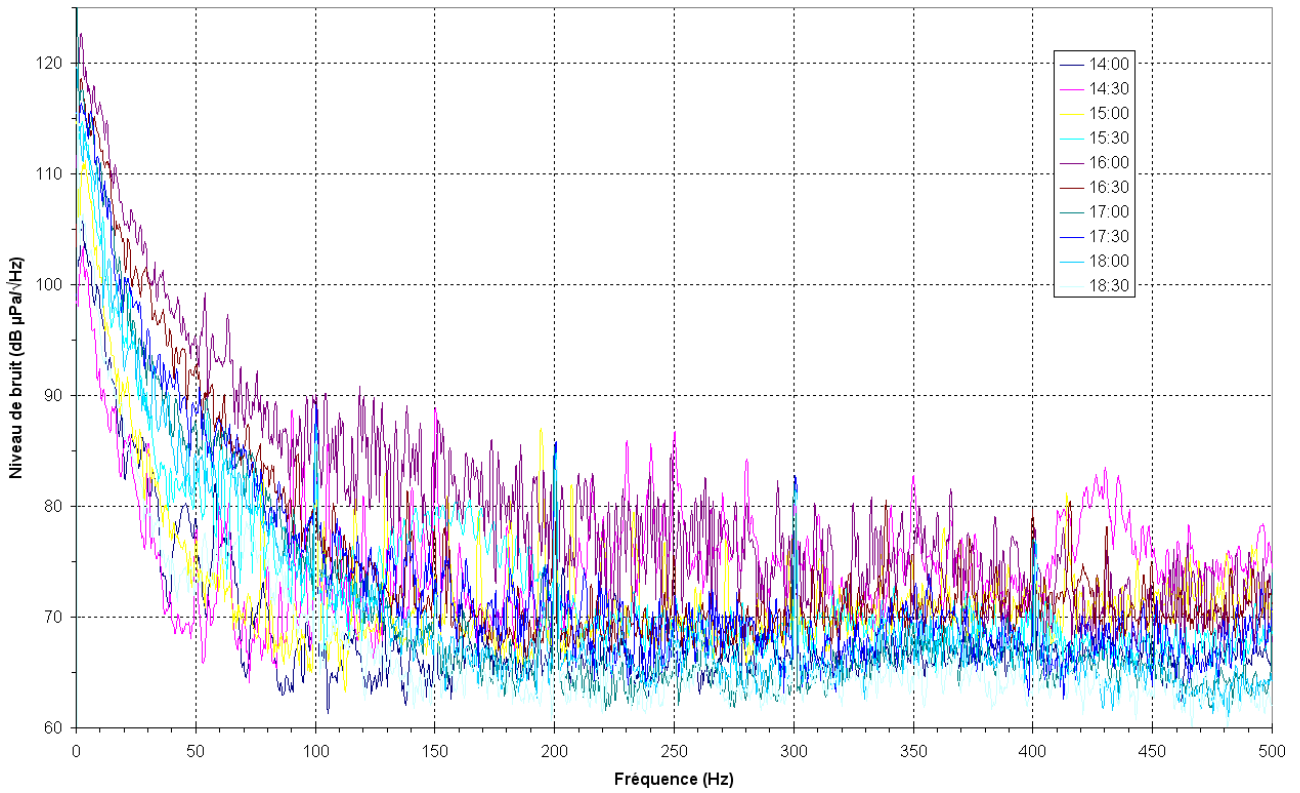


Fig. 5 : niveaux absolus de bruit TBF sans hydrolienne

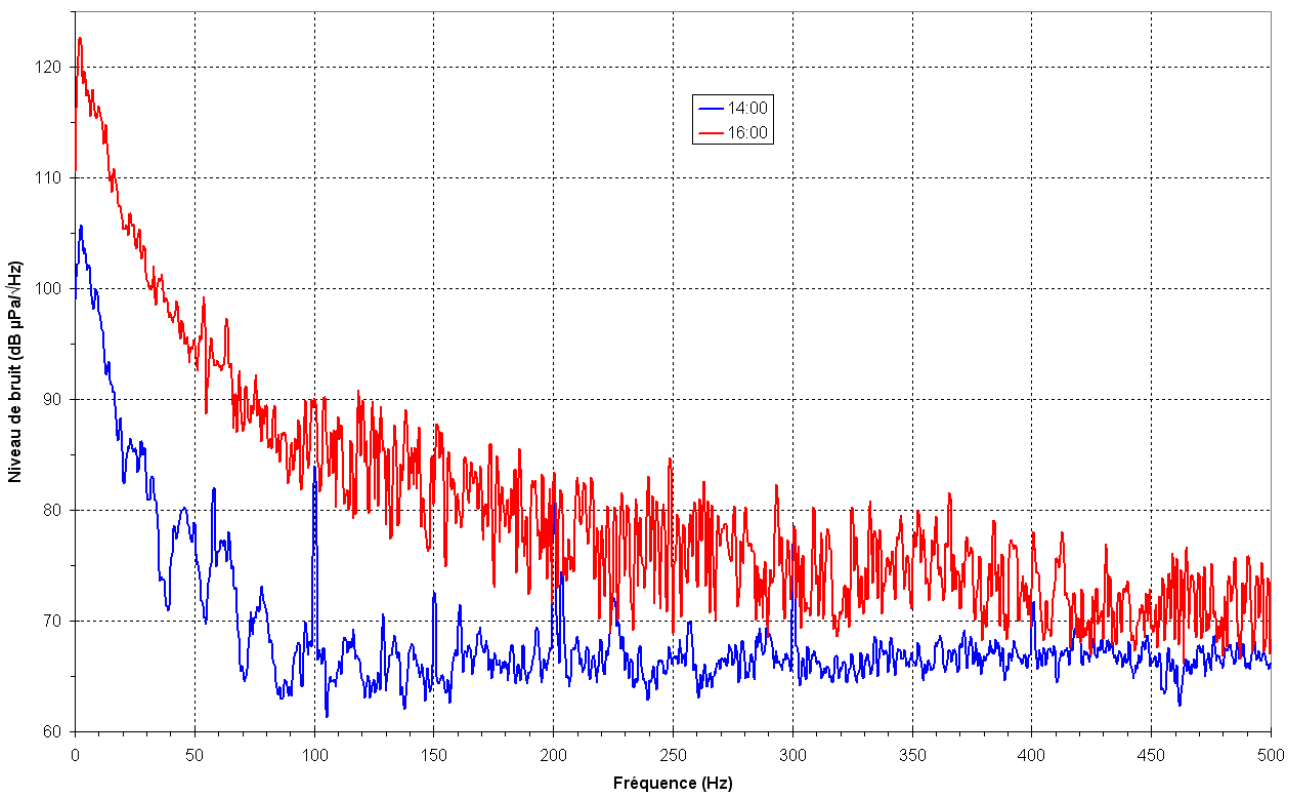


Fig. 6 : niveaux absolus de bruit TBF sans hydrolienne (minimum à 14h00 ; maximum à 16h00)

4.2. Mesures TBF [0, 500 Hz] avec hydrolienne

Les mesures présentées (Fig. 7) sont celles de mardi 22 avril, entre 14h30 et 18h30 (Basse Mer à 12h50), la figure 8 présentant le minimum et le maximum de bruit TBF avec hydrolienne. Si l'on retire les courbes de 17h30 et de 18h30, pour lesquelles le niveau de bruit augmente au delà de 300 Hz (sans explication), les tendances sont les mêmes que celles observées en l'absence de Sabella.

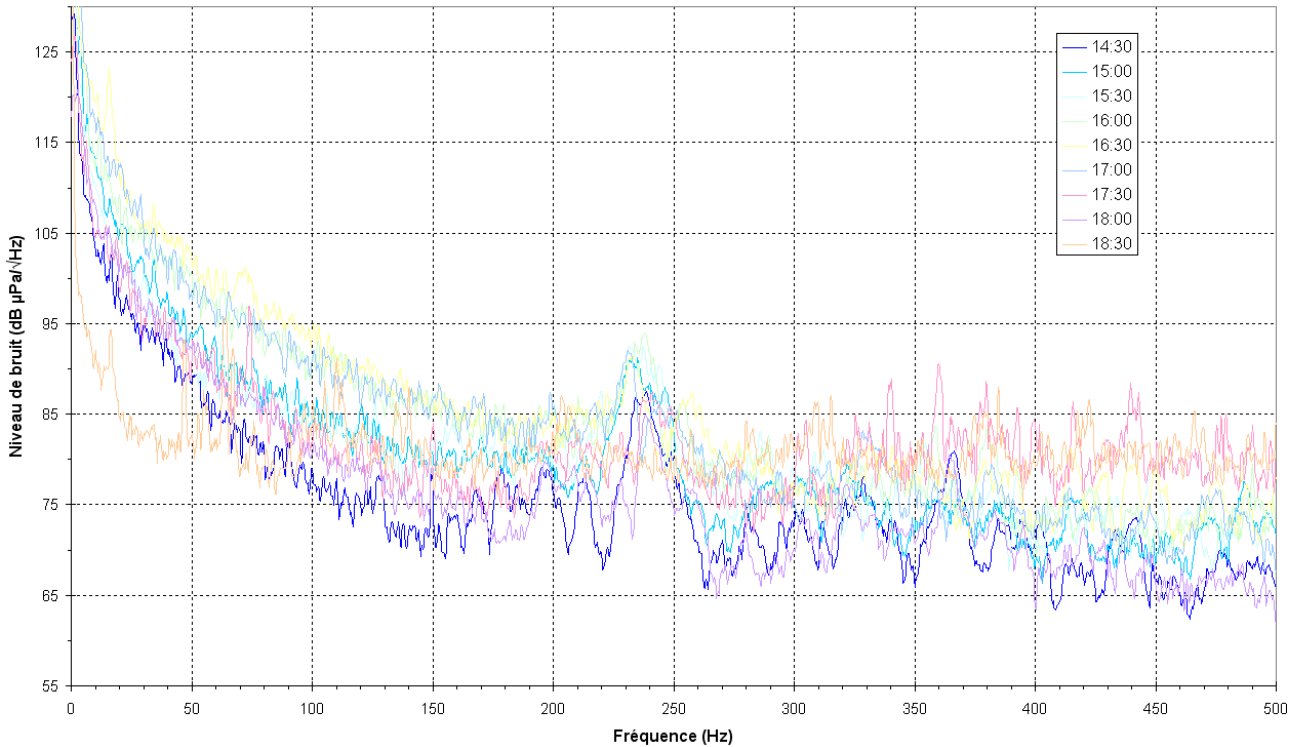


Fig. 7 : niveaux absolus de bruit TBF avec hydrolienne

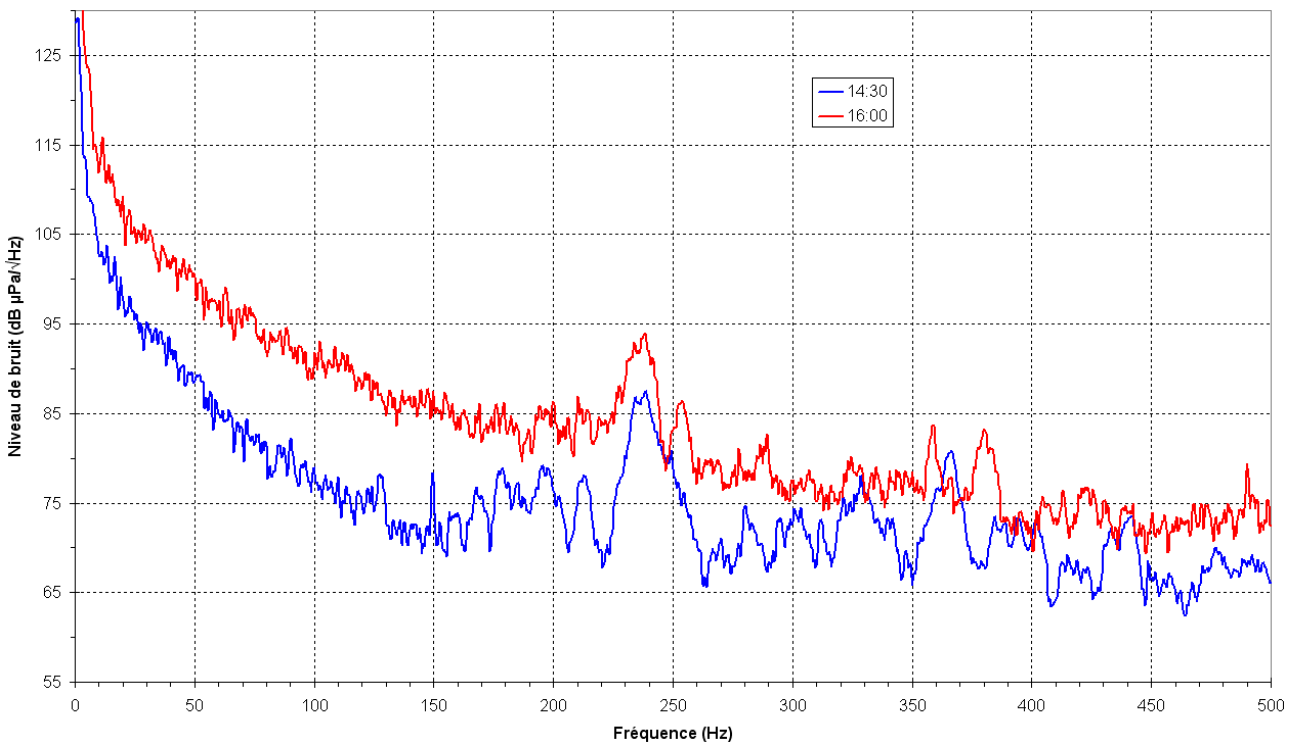


Fig. 8 : niveaux absolus de bruit TBF avec hydrolienne (minimum à 14h30 ; maximum à 16h00)

4.3. Comparaison TBF [0, 500 Hz] avec et sans hydrolienne

Pour des raisons de clarté, aux données mesurées de bruit en présence de l'hydrolienne, on ne superpose que les courbes de bruit minimum et le maximum en l'absence de Sabella (Fig. 9). On remarque tout d'abord qu'aux heures de fort courant (16h00-16h30), pour des fréquences inférieures à 200 Hz, le niveau de bruit en présence de l'hydrolienne est plus élevé que celui mesuré sans Sabella. Cela ne signifie pas forcément que l'hydrolienne est à l'origine de ce niveau plus fort. On constate également un pic autour de 240 Hz, uniquement observable en présence de Sabella.

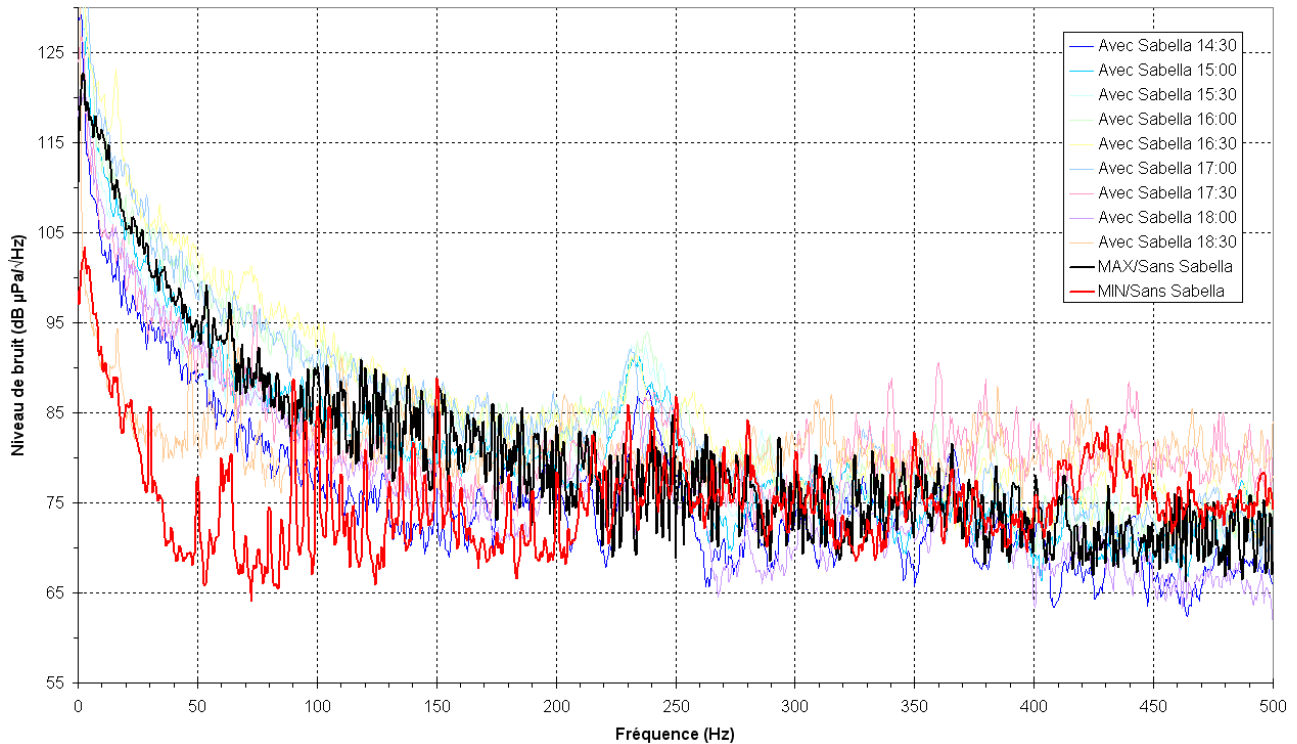


Fig. 9 : niveaux absolus de bruit TBF avec hydrolienne + Maximum et Minimum sans hydrolienne

En isolant les données mesurées à 16h00 (Fig. 10), on observe bien le niveau de bruit légèrement plus élevé (de quelques dB) en présence de l'hydrolienne, et le pic à 240 Hz qui sort nettement du bruit (~15 dB) quand Sabella est en fonctionnement.

La figure 11 présente la comparaison du bruit avec hydrolienne à 15h00 avec le maximum de bruit sans hydrolienne. Les deux courbes se superposent remarquablement jusqu'à 500 Hz, en dehors de la plage fréquentielle autour de 240 Hz et de la gamme infrasonore pour des fréquences inférieures à 10 Hz. Un zoom autour de 240 Hz (Fig. 12) montre que plus le courant est important, plus le bruit mesuré est élevé (maximum observé à 16h00).

L'origine de cette raie 240 Hz n'est pas déterminée : on peut à priori éliminer l'alternateur à 12 pôles qui tourne à mi-marée entre 20 et 30 tours/min ; mode propre de résonance d'un élément de la structure ?, ...

L'étude des différences avec et sans hydrolienne dans la gamme infrasonore est abordée dans le paragraphe suivant.

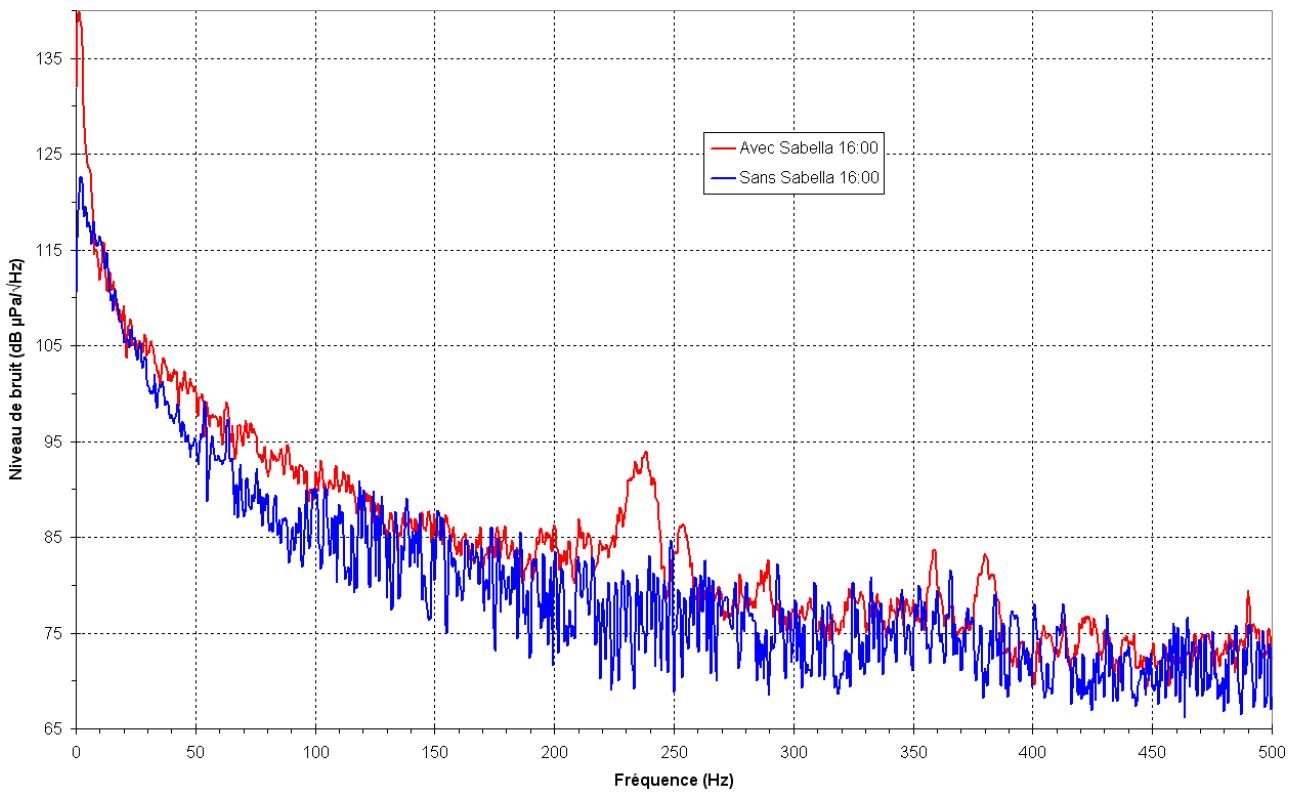


Fig. 10 : niveau absolu de bruit TBF avec et sans hydrolienne à 16:00

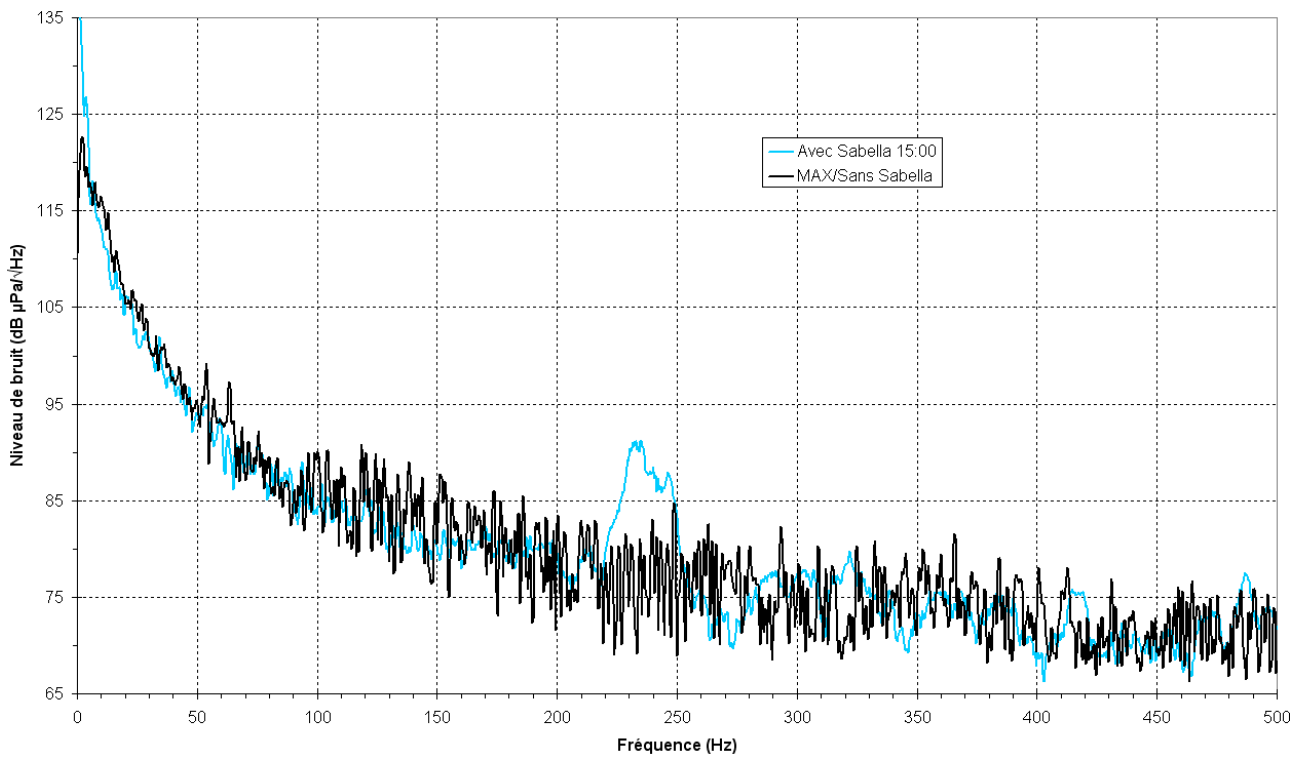


Fig. 11 : niveau absolu de bruit TBF avec hydrolienne à 15:00 et sans hydrolienne à 16:00

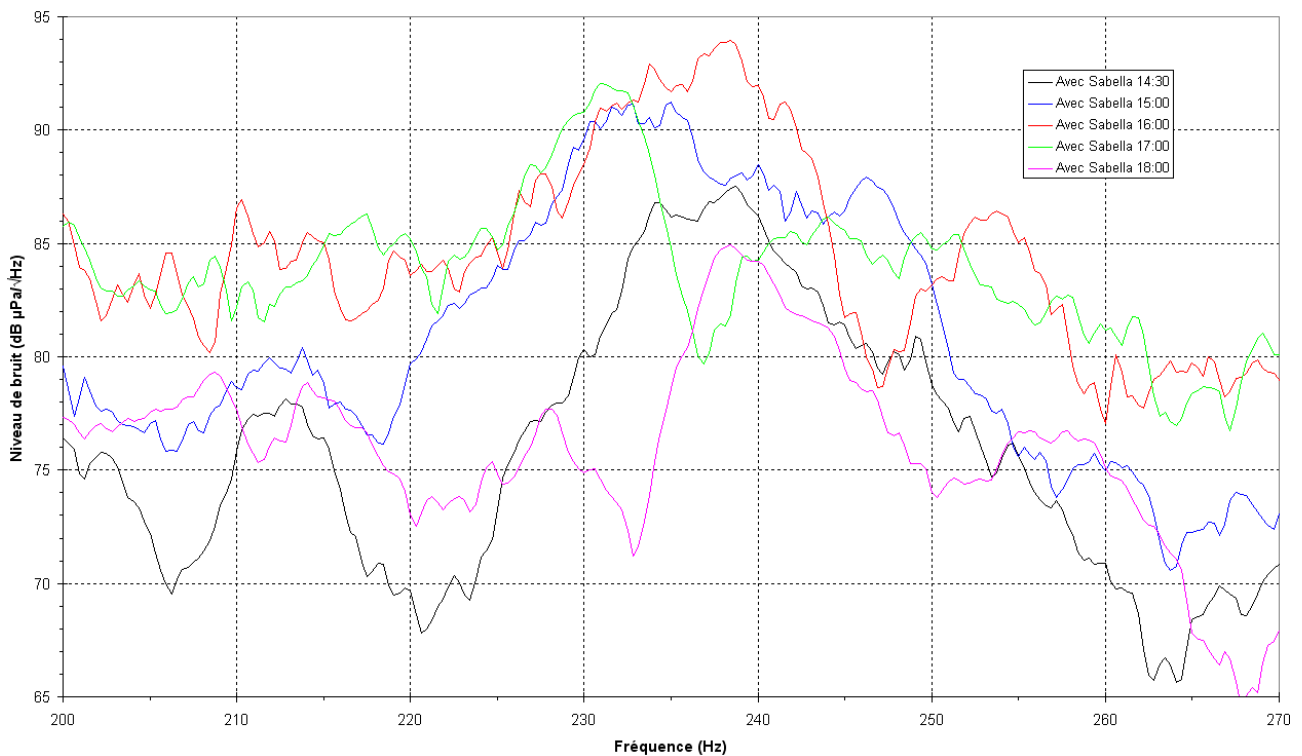


Fig. 12 : niveaux absolus de bruit TBF avec hydrolienne ; zoom autour de 240 Hz

5. Mesures UBF

5.1. Comparaison UBF avec et sans hydrolienne

La comparaison des données UBF avec et sans hydrolienne est réalisée dans la gamme [0, 30 Hz] (Fig. 13), puis dans la gamme [0, 10 Hz] (Fig. 14). L'observation de ces deux courbes nous indique clairement qu'entre 8 et 30 Hz, le niveau de bruit se situe dans la même tranche [80, 110 dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$], en présence ou non de Sabella. Par contre, pour des fréquences inférieures à 7 Hz, l'écart se creuse, et le niveau de bruit peut être de 15 dB supérieur en présence de l'hydrolienne. La seconde contribution de l'hydrolienne au niveau du bruit mesuré s'observe ici très nettement.

La figure 15 extrait les niveaux absolus maximum de bruit avec et sans hydrolienne (à 16h00) : la séparation des deux courbes à 7 Hz est très marquée et l'écart de niveau de bruit mesuré est supérieur à 15 dB. Le niveau maximum mesuré à 1 Hz en présence de Sabella est de 140 dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Ce bruit est vraisemblablement produit à la fois par l'écoulement turbulent et par les pales.

Même si les mesures réalisées pour des fréquences inférieures à 7 Hz sont difficilement exploitables en amplitude (§ 2.5), la tendance comparative est significative.

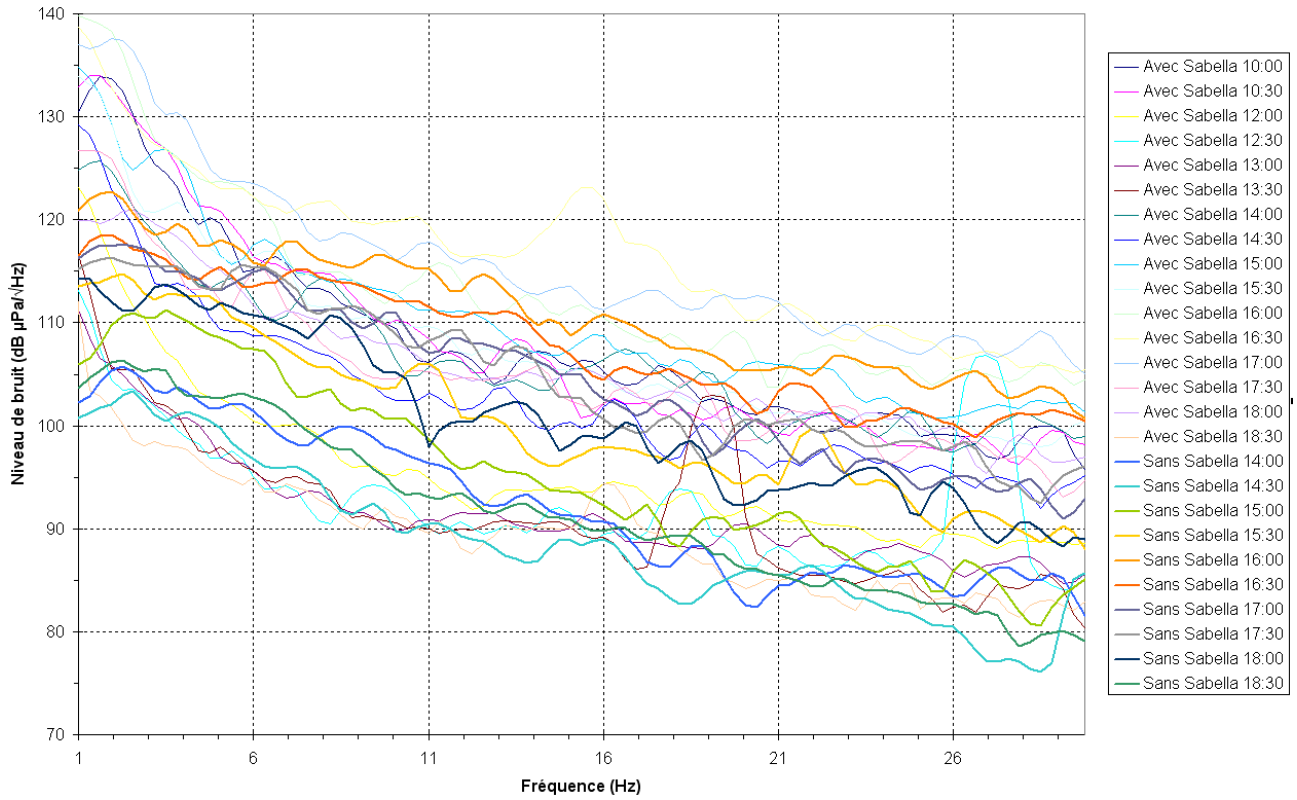


Fig. 13 : niveaux absolus de bruit UBF avec et sans hydrolienne dans la gamme [1, 30 Hz]

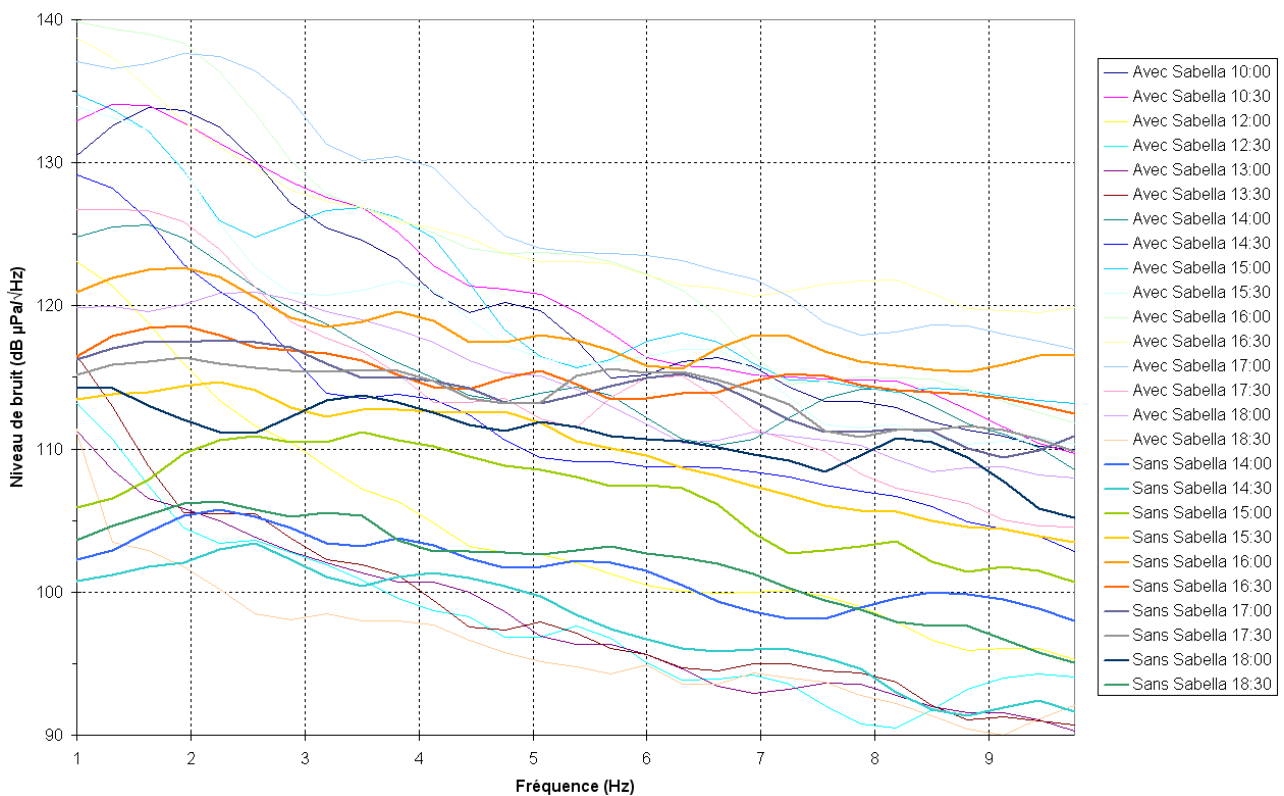


Fig. 14 : niveaux absolus de bruit UBF avec et sans hydrolienne dans la gamme [1, 10 Hz]

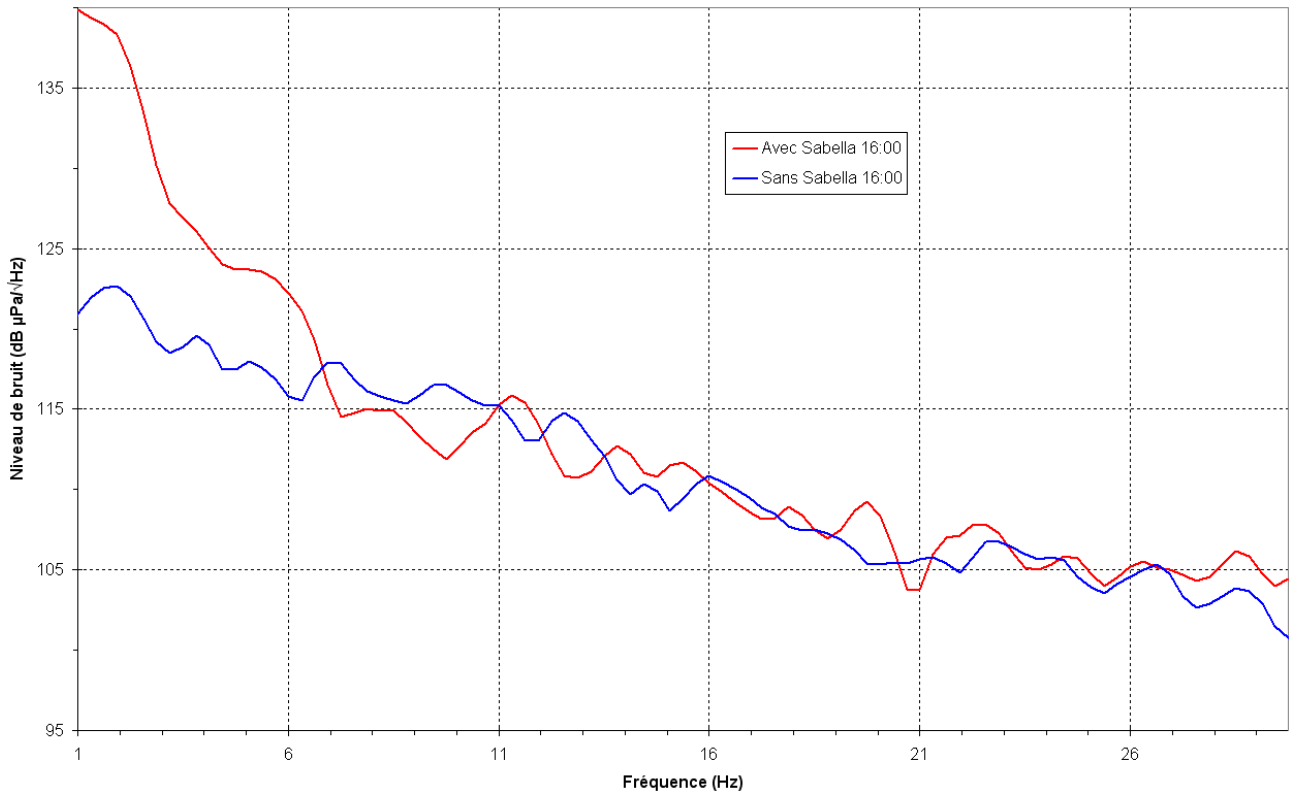


Fig. 15 : niveau absolu maximum de bruit UBF avec et sans hydrolienne dans la gamme [1, 30 Hz]

5.2. Raies UBF supplémentaires

Des raies supplémentaires sont observées sur certaines mesures UBF, en général à des heures de faibles courants. Un exemple est donné sur la figure 16 : à 12h30 et 13h00, on note la présence de séries de raies entre 7 et 30 Hz. Aux heures de forts courants (16h00/16h30), on remarque également (plus difficilement) la présence de quelques uns de ces pics.

Avec l'hydrophone placé à 100 m de Sabella (dans l'axe du chenal de l'Odet), les fréquences de ces raies évoluent avec le courant. Par contre, avec l'hydrophone à proximité de l'hydrolienne (à 15 m sur la falaise), on trouve une raie très marquée à 11 Hz, stable avec le courant (Fig. 17).

Sur certaines mesures sans l'hydrolienne, on observe également la présence de ces raies, et notamment le pic à 11 Hz (Fig. 18). Ce dernier résultat fait penser à un bruit d'origine hydrophonique, plutôt que lié à l'hydrolienne.

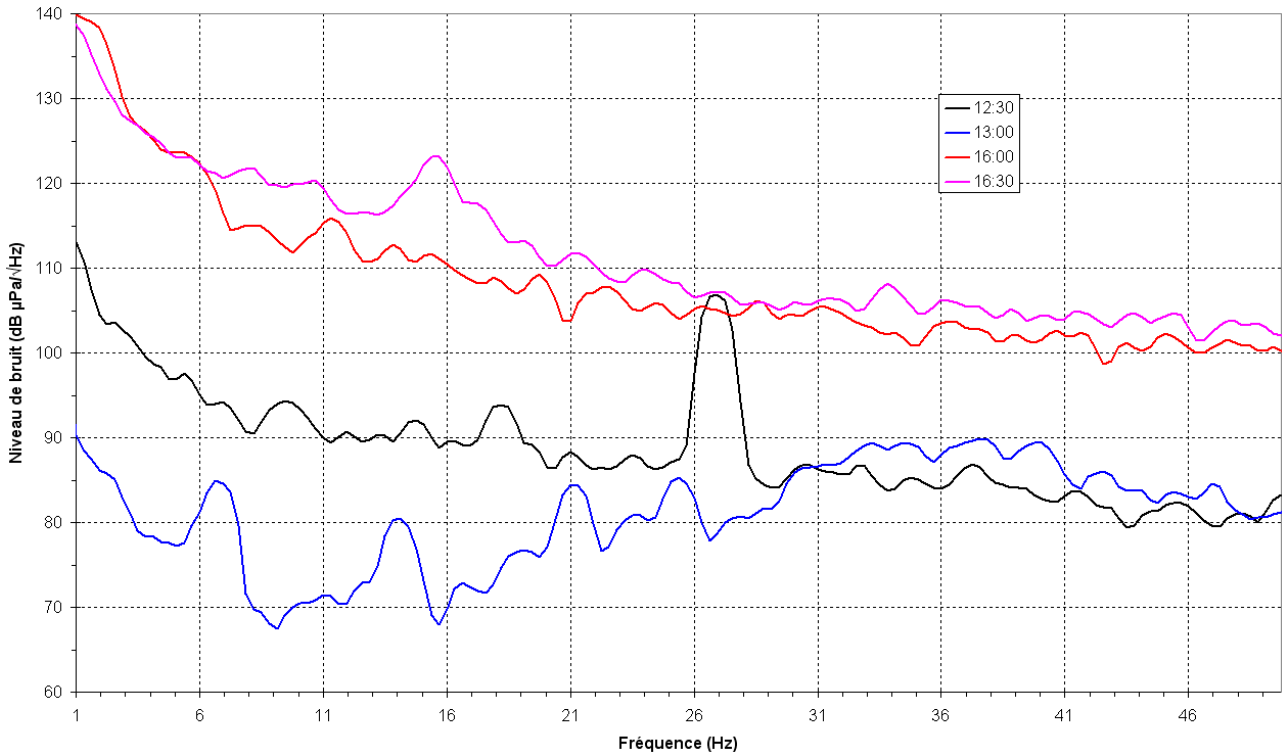
On peut tenter de calculer la fréquence de Strouhal de l'hydrophone, en fonction de la vitesse d'écoulement (Tableau 5). L'hydrophone utilisé peut être assimilé à un tube de 23 mm de diamètre.

Vitesse d'écoulement (nœuds)	Fréquence de Strouhal (Hz)
1	5
2	10
3	15
4	20

Tableau 5 : Fréquence de Strouhal pour un Tube de 23 mm de diamètre

Sur la figure 16, on peut suivre une raie en fonction du courant : de 7 à 15 Hz, entre 12h30 et 16h30. A ces fréquences correspondent des vitesses d'écoulement sur l'hydrophone (Tableau 5) comprises entre 1.5 et 3 nœuds, chiffres certainement proches de la réalité.

Il est donc tout à fait possible que ces raies, présentes avec et sans hydrolienne, puissent provenir d'un écoulement turbulent au niveau de l'hydrophone.



*Fig. 16 : niveaux absolus de bruit UBF avec hydrolienne à faibles et forts courants
Hydrophone à 100 m*

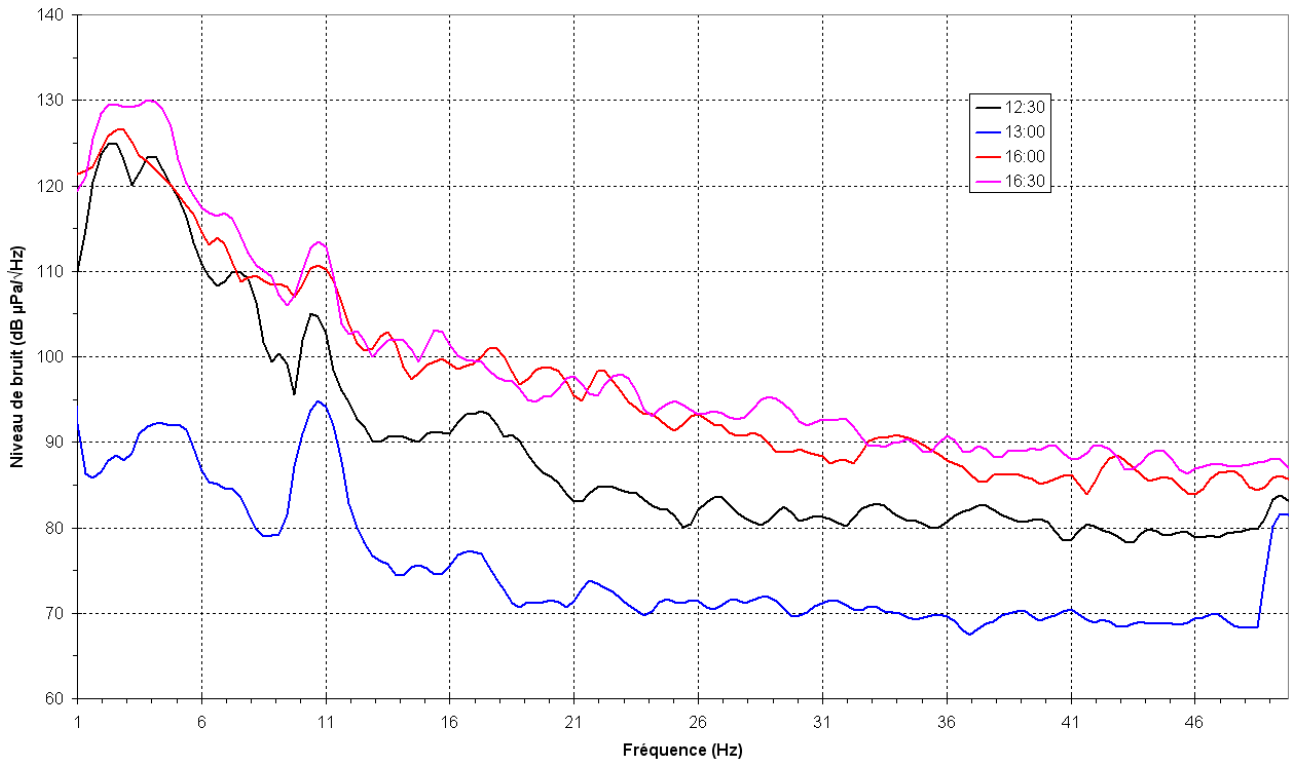


Fig. 17 : niveaux absolus de bruit UBF avec hydrolienne à faibles et forts courants
Hydrophone à 15 m

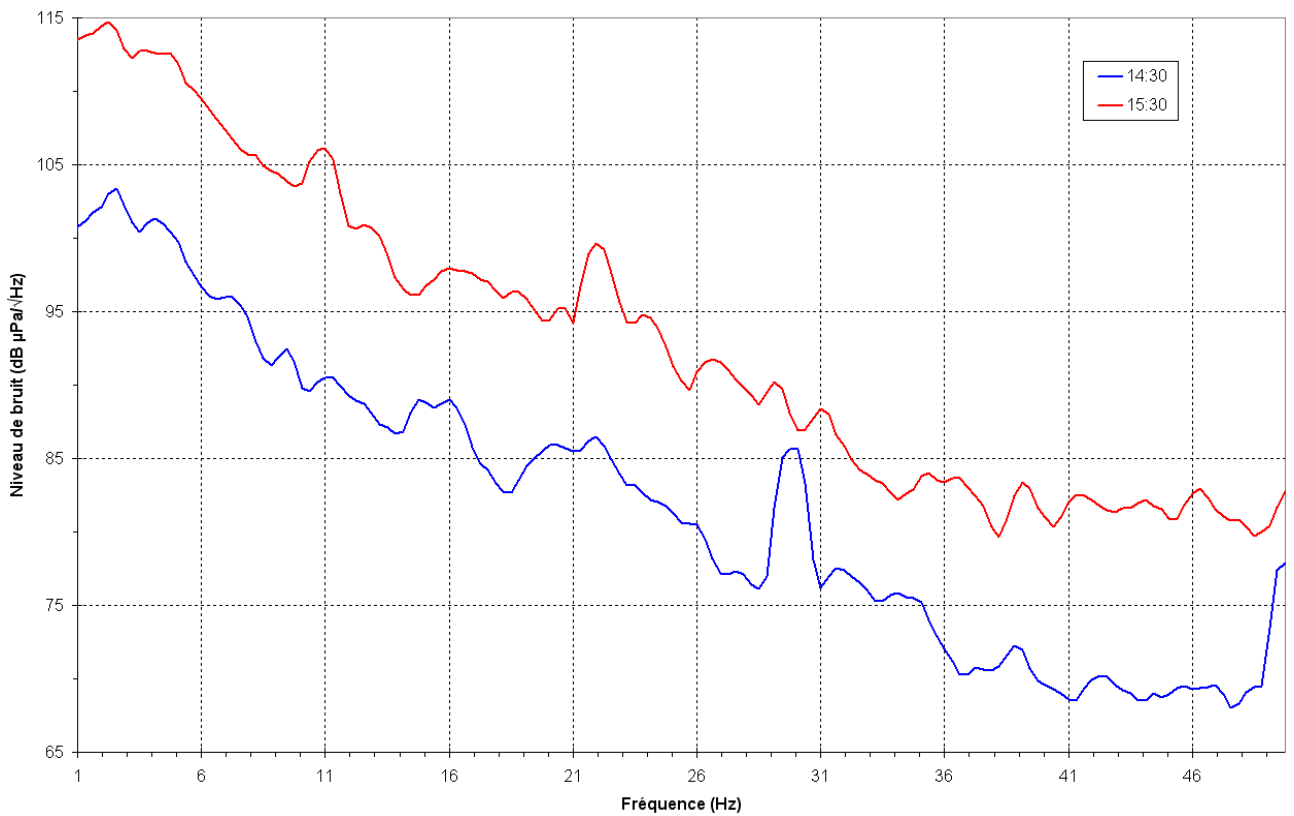


Fig. 18 : niveaux absolus de bruit UBF sans hydrolienne

6. Conclusions

Même si tous les spectres enregistrés ne sont pas expliqués, ces mesures de bruit, effectuées tout d'abord en présence de Sabella, puis sans hydrolienne, nous permettent d'en savoir beaucoup plus sur le comportement acoustique de cet équipement :

1) **L'hydrolienne ne génère pas de bruits haute fréquence**, susceptibles de perturber les mammifères marins de type odontocètes. **Les bruits mesurés dans l'Estuaire de l'Odet sont perceptibles par les odontocètes, mais sont très éloignés de leur seuil de gêne.**

2) Une **raie située autour de 240 Hz**, et dont l'origine est inconnue, a été mesurée uniquement en présence de l'hydrolienne. Même si elle sort nettement du bruit ambiant (~ 15 dB), son amplitude est relativement faible, avec un maximum à **93 dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$** aux heures de fort courants, niveau mesuré sur l'hydrophone placé à 100 m de Sabella.

3) Les différences notables observées avec et sans l'équipement se situent dans la **gamme infrasonore [1, 6 Hz]**, où l'écoulement turbulent au travers de la structure tubulaire et le bruit des pales se font vraisemblablement sentir, avec un **écart maximum de 15 dB environ au voisinage de 1 Hz**. Il est cependant impossible d'extrapoler un niveau de bruit objectif au voisinage de Sabella dans cette gamme de fréquence, en raison de la longueur d'onde très élevée et de la relative proximité de l'hydrophone de mesures (100 m). Le niveau maximum mesuré à 1 Hz en présence de Sabella est de **140 dB $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$** .

Enfin, il est possible de comparer le niveau de bruit absolu maximum mesuré sur l'hydrophone situé à 100 m de Sabella, avec le niveau de bruit maximum recommandé par l'ICES (International Council for the Exploration of the Sea) concernant les navires de recherches halieutiques¹, afin d'éviter tout évitement des poissons (morues, harengs, et espèces similaires) à une distance d'au moins 20 m (Fig. 19).

Il est donc vraisemblable que seul le bruit généré dans la gamme [0, 5 Hz] soit susceptible de provoquer des interactions avec la faune marine.

¹ Underwater Noise of Research Vessels – Review and Recommendations – R.B. Mitson – ICES - Copenhagen – May 1995.

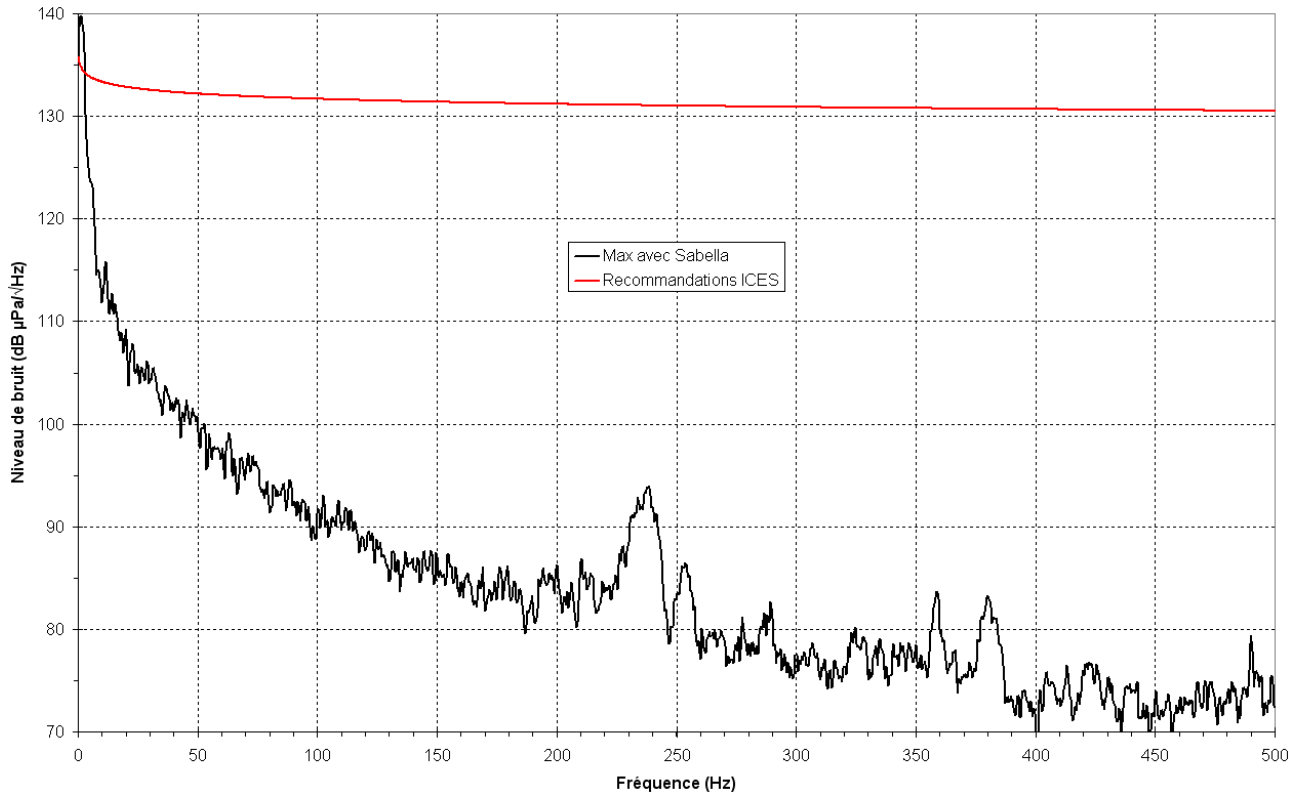


Fig. 19 : niveau absolu maximum de bruit UBF avec hydrolienne et seuil de recommandation ICES