

# Traitements et estimation des performances en portée et précision en vitesse des ADCP

G. Kervern - 2024 07 02  
DIY Oceanography BZH



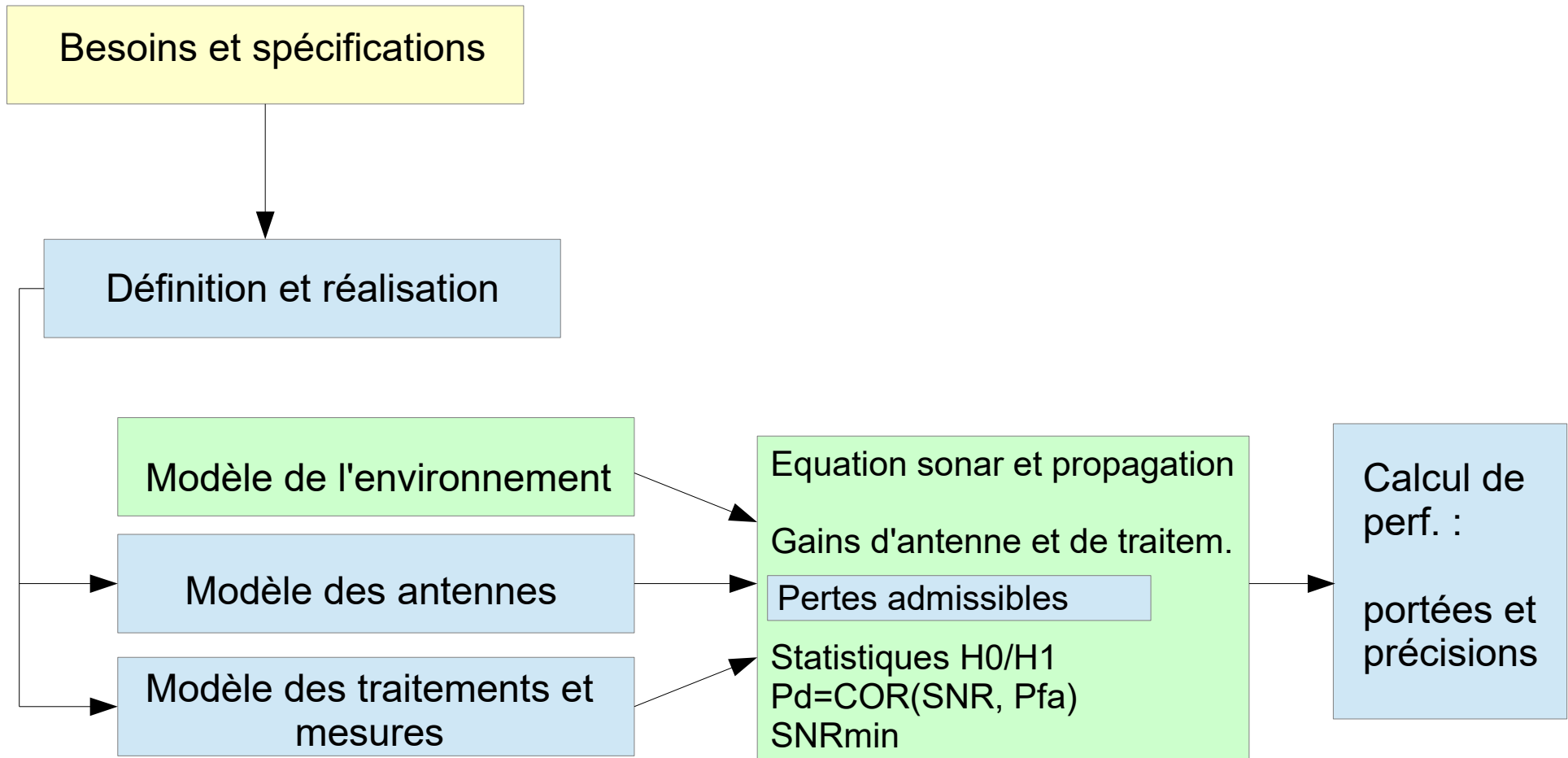
# Contexte

- Une action dans le cadre de la définition et la mise au point d'un ADCP “open source” et “low cost”
- Mesure du courant par mesure du décalage doppler de la réverbération de volume (ADCP)
- Méthode standard (depuis la fin des années 90) : “covariance à large bande” et traitements apparentés
- $f_0$  de 50kHz à 1MHz selon la portée désirée (~1km à 25m),
- $T \sim$  qqe ms,  $B \sim$  de qqes 1/T à 10kHz,
- Précision en vitesse  $\sim 10\text{cm/s}$   $\sim 0,2\text{nds}$

# Estimation des performances en portée et précisions en vitesse et distance des ADCP

- finalité : participer à concevoir un équipement ou à valider un équipement déjà existant
- mais aussi un élément de la méthode d'acceptation d'un équipement :
  - 1 : estimation académique/théorique des performances
  - 2 : négociation des “pertes” admissibles selon l'état de la technologie et l'objectif de coût
  - 3 : vérification en labo (sig.simulés) puis in-situ des performances

# Estimation des performances en portée et précisions en vitesse et distance des ADCP



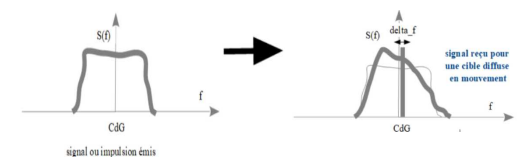
# Mesure doppler d'un écho

- **Méthode standard :**

- Emission d'une impulsion pure ( $T, f_0$ ) en général pondérée et traitement en réception par “filtrage adapté multihypothèse doppler”
- “Filtrage adapté multihypothèse doppler” = TF glissante sur segment tpri pondéré
- décalage doppler = décalage du CdG du spectre de l'écho reçu
- méthode rapide de mesure du CdG du spectre : “méthode de la covariance”
- “méthode de la covariance” = calcul du déphasage entre des paires d'échantillons décalés de  $\tau = T/2$

- **Nature diffuse de la cible :**

- bruit “interne” au signal de réverbération de type speckle
- altération de la position du CdG  $\rightarrow$  correction de la mesure par moyennage
- “méthode de la covariance intégrée” = calcul du déphasage entre paires d'échantillons décalés de  $\tau = T/2$  et moyennage des déphasages sur  $T_{int} \geq T$



$$\gamma(\tau) = \frac{1}{T} \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} S_{\text{reverb. vol.}}(t) \cdot \bar{S}_{\text{reverb. vol.}}(t + \tau) dt$$

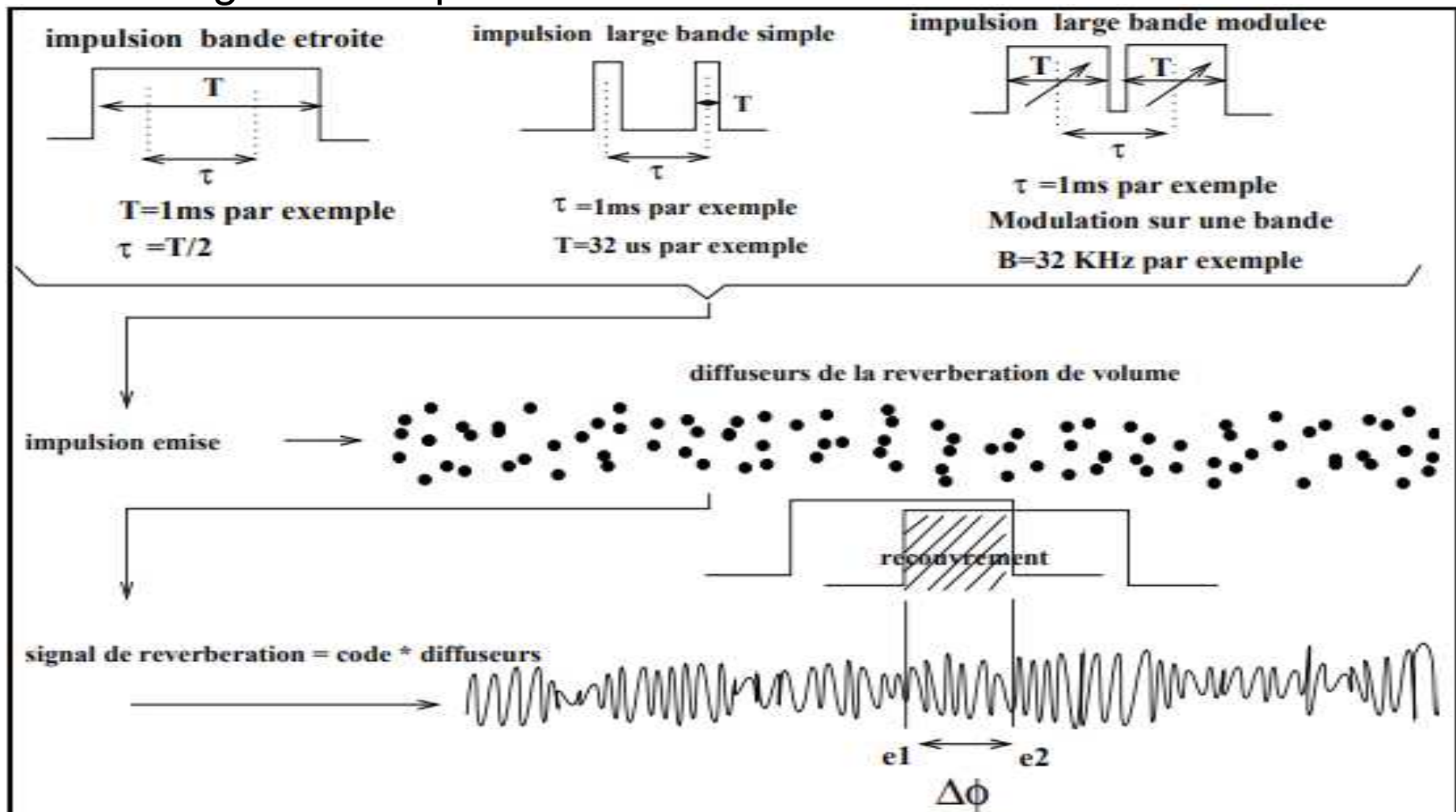
après démodulation à  $f_0$

$$v(t) = \frac{c}{4\pi f_0 \tau} \Phi_\gamma = \frac{c}{4\pi f_0 \tau} \cdot \text{Arg}(\gamma(t))$$

# Passage à la covariance à large bande

Méthode standard :

méthode de la covariance sur une paire d'impulsions : une estimation rapide du CdG du spectre (brevets RDI ~1993) = version rapide d'un "traitement général" à préciser.





# Proposition d'une "fonction d'appareil" pour cible diffuse et d'un "traitement général" fréquentiel (et aussi un dual temporel !)

Fonction d'ambiguïté classique (Woodward) distance-vitesse  $\chi(\tau, \nu)$ :

$$\chi(\tau, \nu) = \int f_{emis}(t) \cdot \overline{f_{doppleree}(t - \tau)} dt$$

Le "traitement général"

L'application de cette formule à un signal de réverbération de volume conduit à des résultats décevants.

$$\xi(\tau, \nu) = r_{diff} * f * \tilde{f}_{doppleree} = r_{diff} * \chi_{\nu}$$

La nature aléatoire de  $r_{diff}$  conduit à moyenner temporellement  $\xi$  et donc à proposer un traitement du signal de réverbération de volume que nous appellerons "traitement général" et défini comme suit:

$$\xi(\tau, \nu) = \frac{1}{T} \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} |S_{reverb. vol.} * \tilde{f}_{doppleree}|^2 dt$$

$T_{int} \geq T$

Fonction d'appareil définie par:

fonction Q :

$$X(\nu) = \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} |\chi(t, \nu)|^2 dt$$

$$X(\nu) = C_{spectre, spectre}(\nu)$$

$$X(\nu) = TF(|C_{code, code}(t)|^2)$$

→ Codes à répétition d'un motif modulé ou PTFM

p.ex :

$$\text{code}(t) = \text{FML} * (\uparrow + \uparrow)$$

$$\text{spect}(\nu) = |TF(\text{code})|^2 = |\prod \cos|^2$$

$$\chi(\nu) \approx \Lambda + \Lambda \cdot \cos 2 \quad (\sim \text{fonction Q}):$$

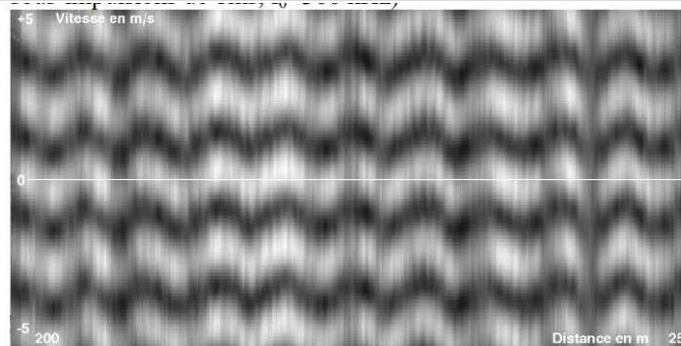
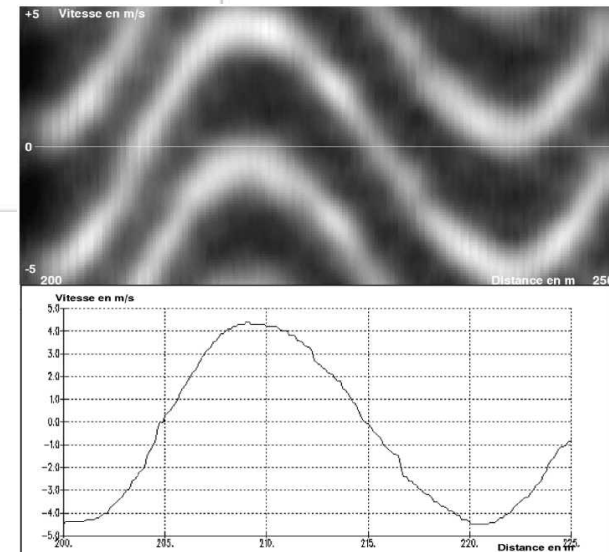


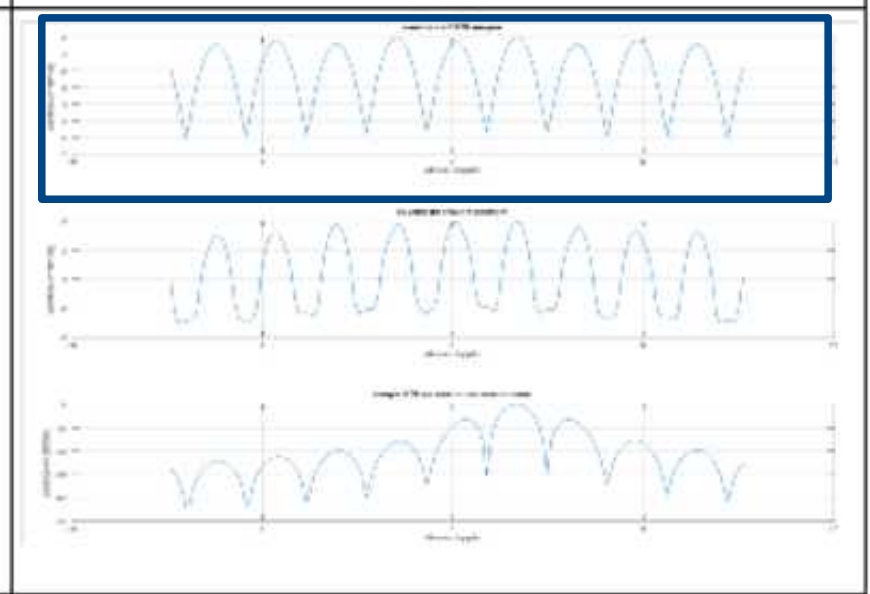
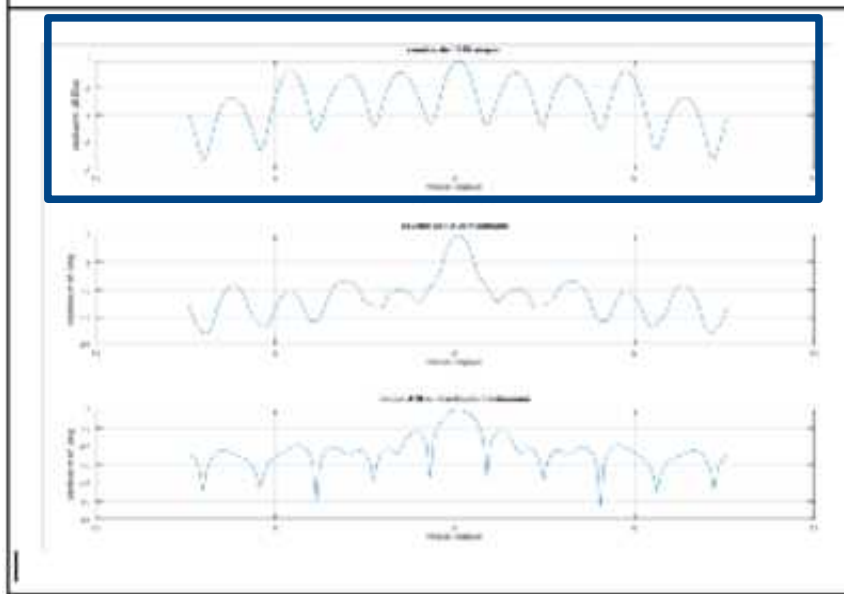
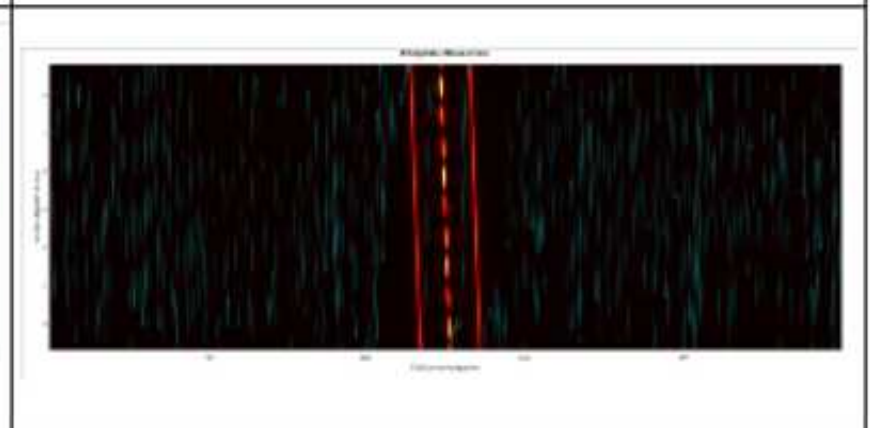
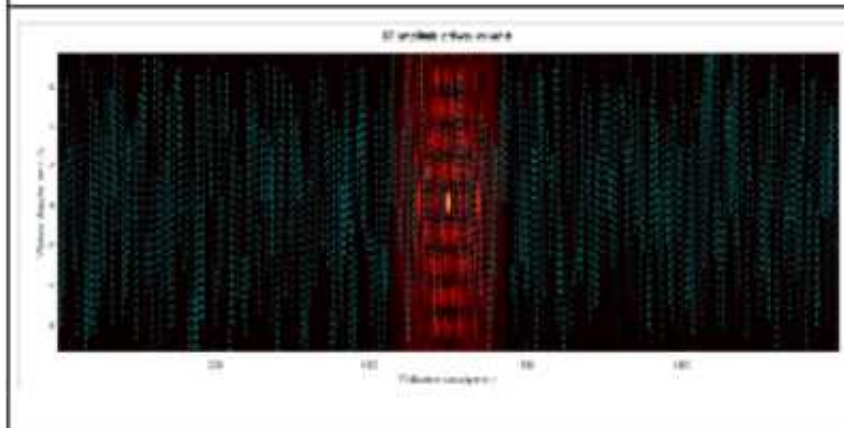
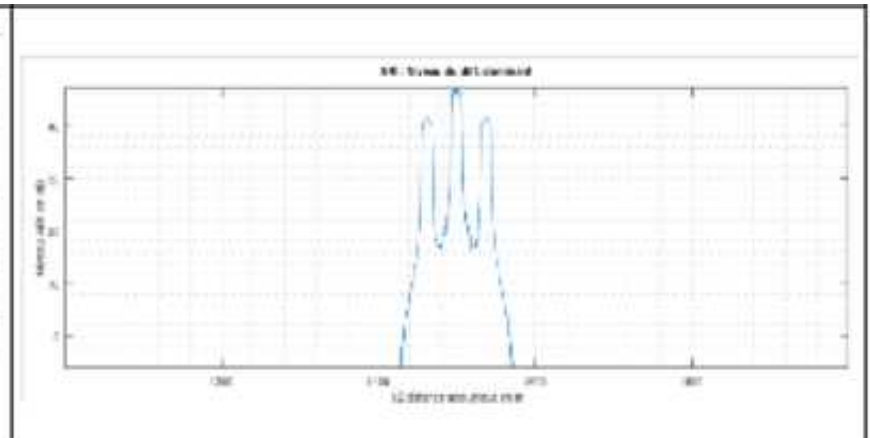
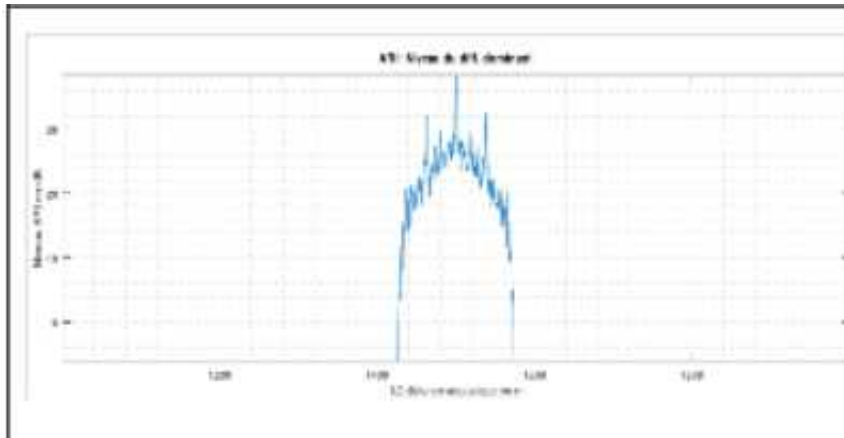
Figure 5 : Estimation dans le plan vitesse-distance par la méthode générale d'un profil sinusoïdal de vitesse (période 5m, amplitude  $\pm 0,3$ m/s), l'impulsion émise est double et modulée ( $T=1$ ms,  $B=32$ kHz, modulation linéaire de fréquence, écart entre sous-impulsions de 1ms,  $f_0=300$  kHz)



Figures 6 et 7 : Estimation dans le plan vitesse-distance par la fonction d'appareil  $\chi(\tau, \nu)$  (exactement dopplérisée) d'un profil sinusoïdal de vitesse (période  $\approx 20$ m, amplitude  $\pm 4,5$ m/s), l'impulsion émise est la répétition d'ordre 4 d'un motif modulé ( $T=0,5$ ms,  $B=64$ kHz, modulation linéaire de fréquence, écart entre sous-impulsions de 0,5ms, durée totale de l'impulsion 2ms,  $f_0=300$  kHz)

2 BPSK 50ms, 31 moments, BT=31

2 FML 50ms 600Hz, BT=30



Fonction Q :

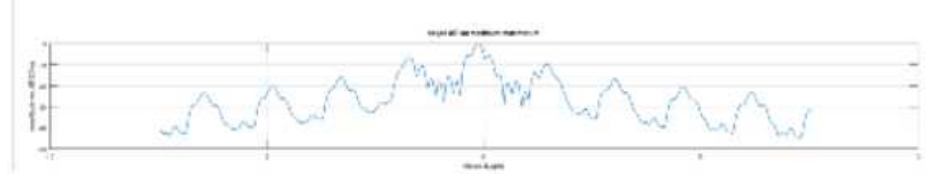
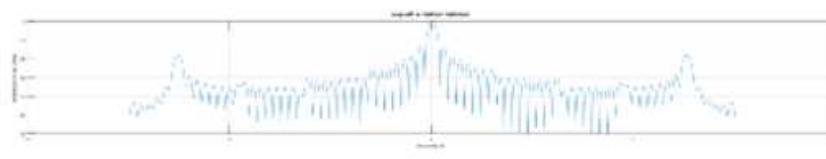
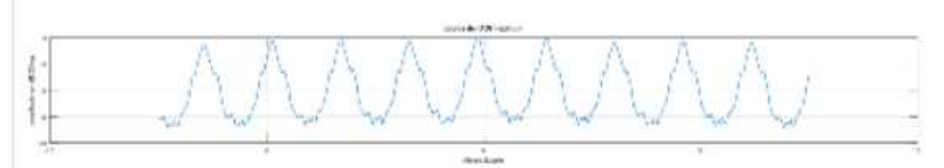
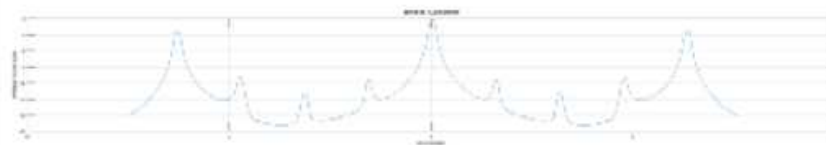
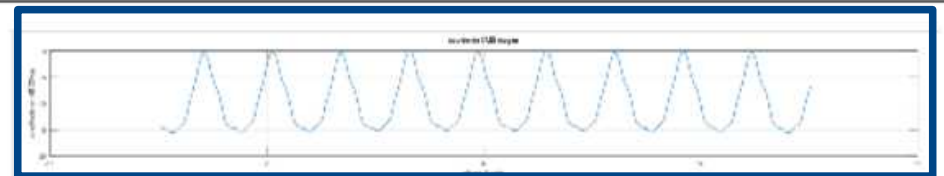
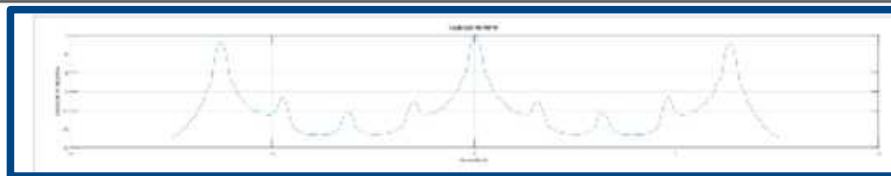
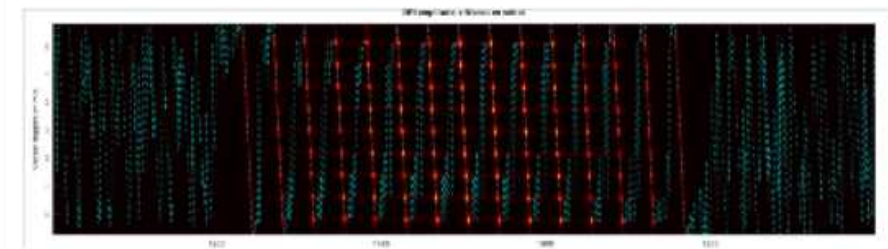
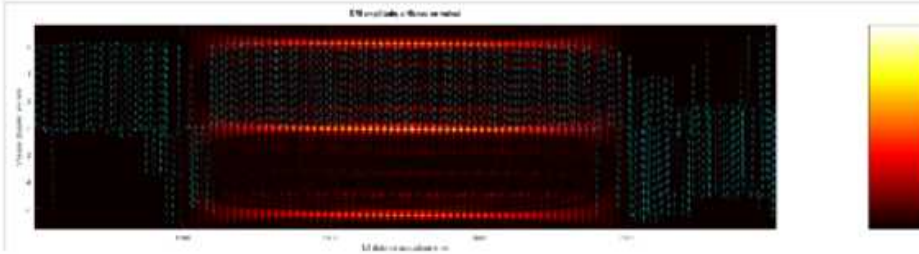
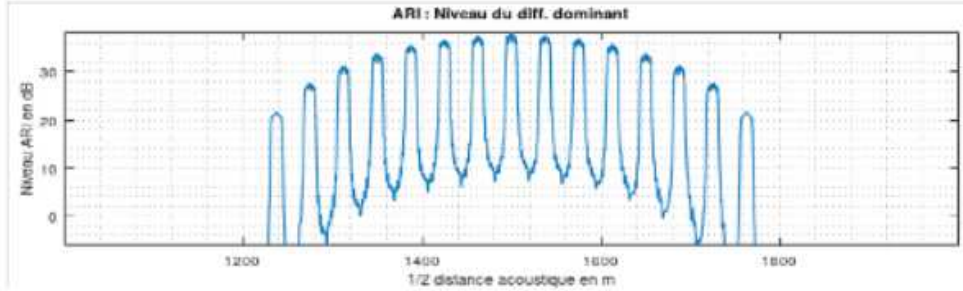
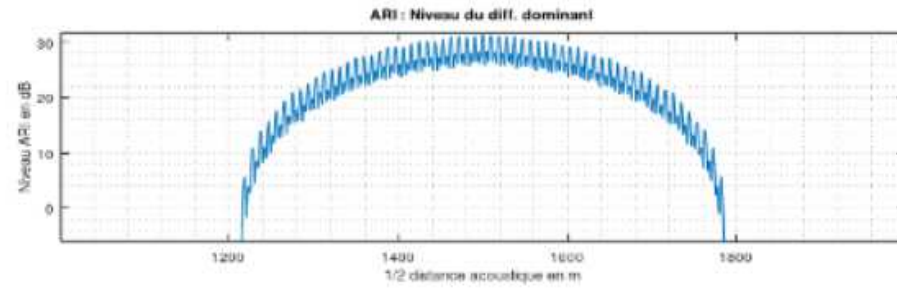
période en doppler :  $\pm v_{na} = \pm c / (4f_0T)$

Largeur des pics  $\approx c / (2f_0T)$

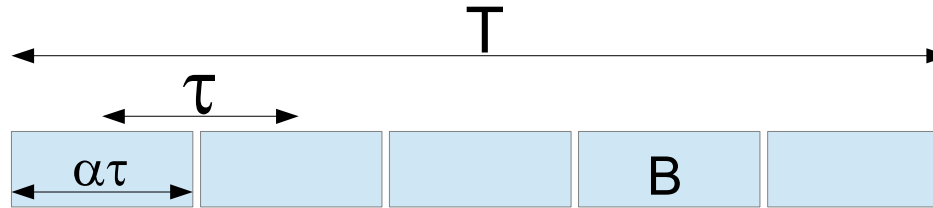


8 BPSK 50ms, 31 moments, BT=31

8 FML 50ms 600Hz, BT=30



# Comparaison des codes à répétition de motifs modulés (PTFM)



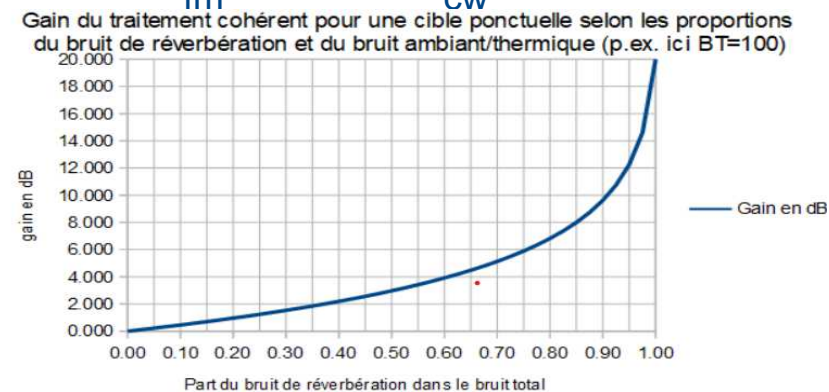
Aspect général de la fonction Q :

- structure périodique en doppler :  $c / (2f_0\tau)$
- largeur des pics en doppler :  $\approx c / (2f_0T)$
- résolution en distance avant post-intégration (PI) :  $\approx c/(2B)$
- résolution en distance après PI :  $\approx c/(2T_{\text{int}})$
- gain (cib. ponctuelle, apt/avt trait.) vis à vis du bruit ambiant ou thermique :  $\alpha T$ ,  $\alpha$  de 0 à 1
- gain (cib. ponctuelle, apt/avt trait.) vis à vis du bruit de réverbération :  $BT$
- formes et niveaux respectifs des pics doppler : dépend du type de la modulation et du nombre de motifs  $N=T/\tau$  (à approfondir)

# Quelques considérations sur le SNR pour les codes modulés

- Pour une cible “ponctuelle” et vis à vis d'un bruit ambiant/thermique dominant et indépendant du signal, un “théorème classique” du FA :  
 $\text{snr} = \text{Energie du pulse} / \text{DSP du bruit} : \rightarrow \text{snr}_{\text{fm}} = \text{snr}_{\text{cw}}$

- Mais vis à vis du bruit de réverb. :  $\text{Pu}_{\text{réverb\_FM}} = \text{Pu}_{\text{réverb\_CW}}$  alors que l'écho de la cible est accru de BT :  
 $\rightarrow \text{snr}_{\text{fm}} = \text{BT} \cdot \text{snr}_{\text{cw}}$



- Pour une cible “diffuse” comme la réverbération et vis à vis du bruit ambiant/thermique, l'écho est constant alors que le bruit augmente en BT donc le snr diminue en BT mais la PI scalaire peut l'accroître en  $\sqrt{\text{BT}}$  :  
 $\rightarrow \text{snr}_{\text{fm}} = \text{snr}_{\text{cw}} / \sqrt{\text{BT}}$
- et le gain en précision dépend de  $\text{snr}_{\text{cw}}$  !

FA : filtrage adapté

PI : post-intégration

$\text{snr} = \text{rsb} = \text{rapport signal sur bruit}$

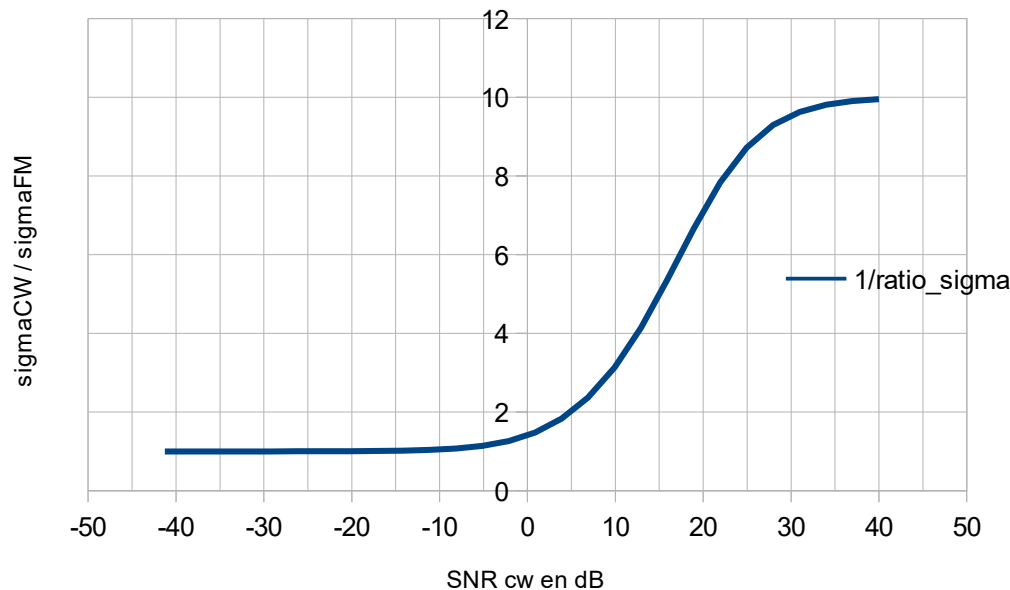
$\text{Pu}$  : puissance

# Impulsion CW de durée T VS N impulsions modulées

## de bande B et de durée $\tau=T/N$

- on suppose le profil en vitesse d'une "résolution" en distance  $\geq cT/2$
- en CW, la précision doppler s'écrit :  $\sigma_v = k/fo/T/\sqrt{((1+\text{snr})/\text{snr})}$
- en FM après traitement et PI, la précision doppler s'écrit :  
$$\sigma = k/fo/T/\sqrt{((BT+\text{snr})/\text{snr})}/\sqrt{BT_{\text{nt}}}$$
 avec  $T_{\text{int}} = T$

Rapport des précisions en vitesse entre modes CW et FM (ex. BT=100)

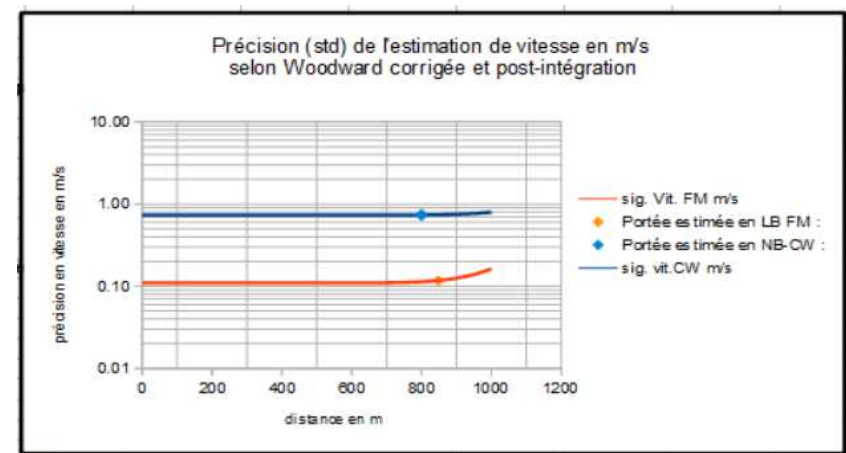
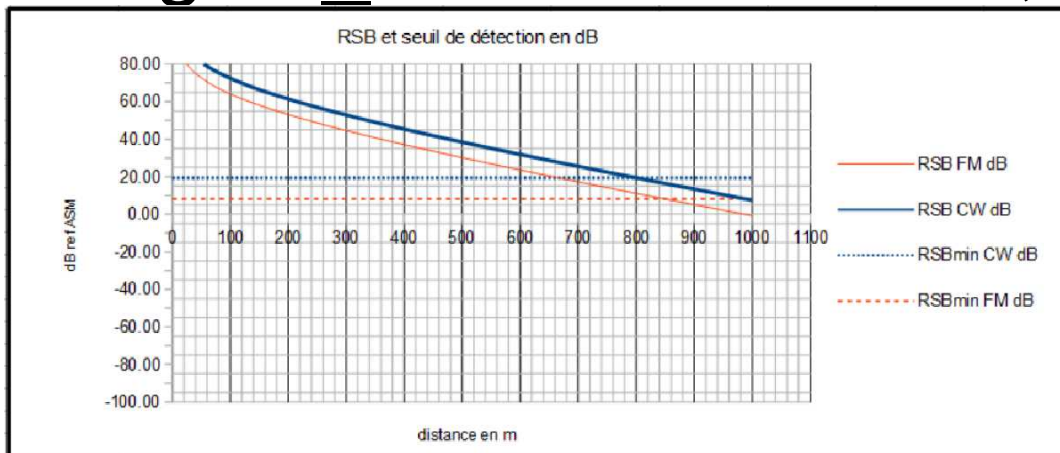


- gain compris entre 1 et  $\sqrt{BT}$  selon la valeur du  $\text{snr}_{\text{CW}}$ . Donc en principe l'usage du mode FM ne fait pas perdre en précision même si le SNR baisse ! **Est-ce que cela est observé expérimentalement ?**

# Estimation des portées et vitesses

- Equation sonar : ~ bilan de propagation de type “photométrique” ~ en flux de puissance permettant d'établir le  $\text{SNR}(x,y,z,t)$
- Traitement supposé : “traitement général” ~ FA=corrélation + PI scalaire + détection
- Code émis : paire d'impulsions modulées de bande B et durée T
- Mesure de vitesse suivant une précision ( $\sigma$ ) de type Woodward :  
$$\sigma_v = k / [f_o T \sqrt{(\text{snr}') \sqrt{BT_{\text{int}}}}]$$

- ADCP type RDI
- $f_0=75\text{KHz}$ ,  $SL=214\text{dB}$ ,  $T=6\text{ms}$ ,  $B=7.5\text{KHz}$
- Portée ADCP NB CW  $\approx 800\text{m}$  (à  $SL\ 200\text{dB}$ :  $577\text{m}$ )
- LB FM  $\approx 848\text{m} < \text{portée DVL}$
- Taille case en distance :  $4.5\text{m}$
- $\text{Sigma\_V}=12\text{cm/s}$  en FM,  $74\text{cm/s}$  en CW



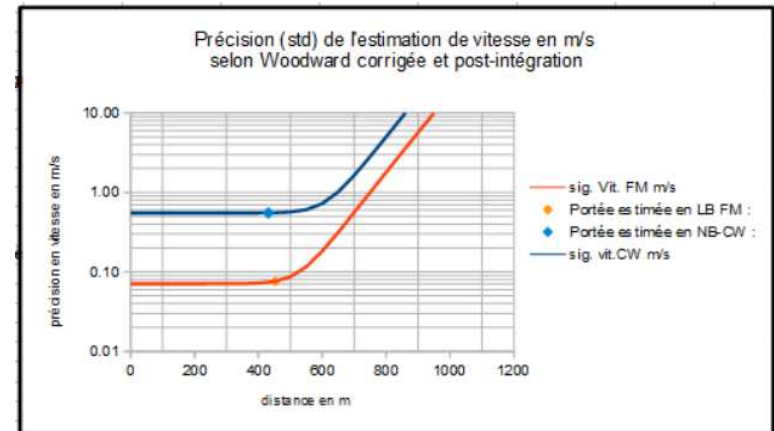
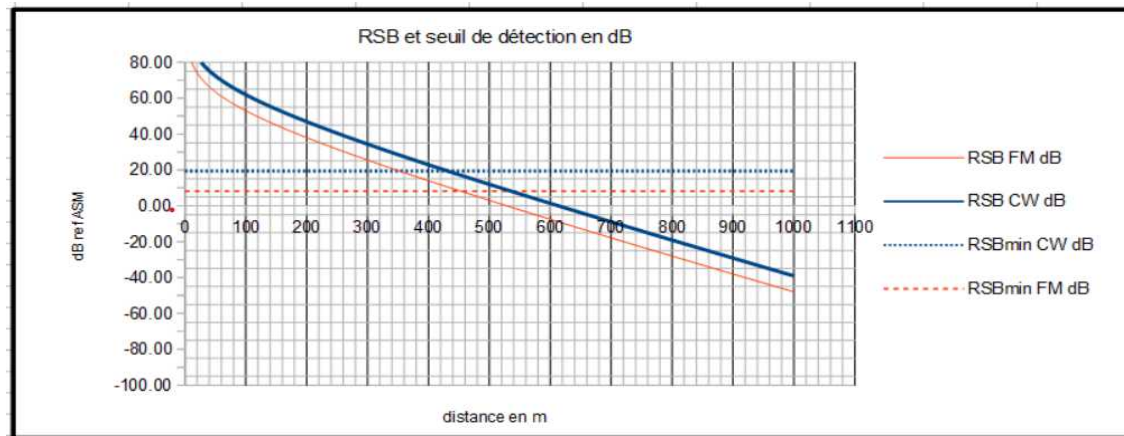
Teledyne RDI Workhorse Long Ranger 75 kHz ADCP

	Depth Cell Size	Std Dev. <sup>1</sup>	Range <sup>2,3,4</sup>
High Resolution (wide bandwidth)	4 m	15.0 cm/s	432 m
	8 m	7.6 cm/s	465 m
	16 m	3.9 cm/s	503 m
	32 m	2.0 cm/s	545 m
Long Range (narrow bandwidth)	4 m	29.0 cm/s	525 m
	8 m	14.6 cm/s	560 m
	16 m	7.6 cm/s	600 m
	32 m	3.9 cm/s	644 m

$F_0 = 75$ kHz							
2 mode FM à B et B/4		trop fort pour	mode haute résolution B	mode basse résolution B/4			
$T_{fm}=T_{int}$ en mode FM		pour les perf.	en m/s	en m/s			
$B_{max}=6.0\text{kHz}$		$rsb \gg 1$	$rsb \gg 1$	$rsb \gg 1$			
résol. en m	T ou $T_{int}$ en s	$\sigma V_{CW}$	B supp. en kHz	$\sigma V_{FM}$	B supp. en kHz	$\sigma V_{FM}$	
4.00	0.0053	0.83	6.0	0.146	1.5	0.292	
8.00	0.0107	0.41	3.0	0.073	0.8	0.146	
16.00	0.0213	0.21	1.5	0.036	0.4	0.073	
24.00	0.0320	0.14	0.8	0.028	0.2	0.056	

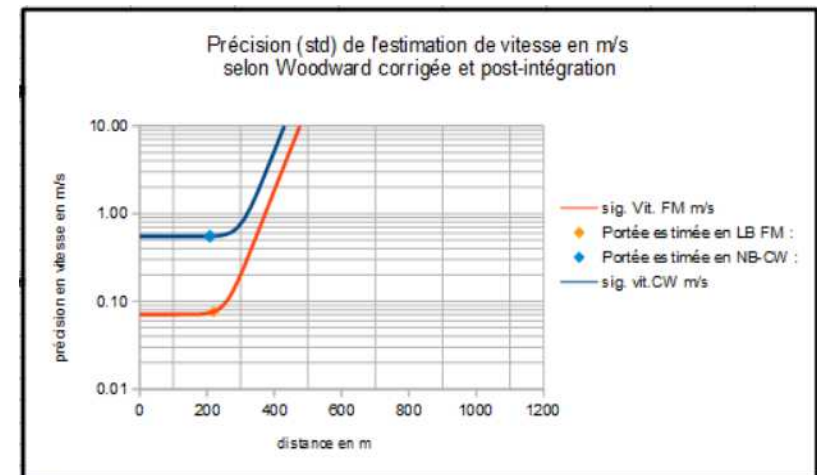
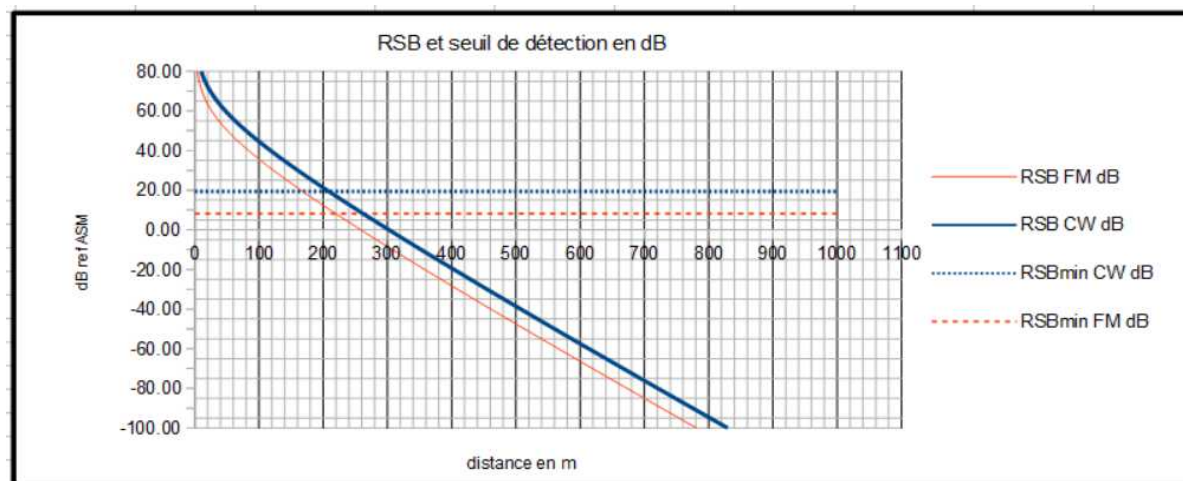


- ADCP type RDI
- $f_0=150\text{KHz}$ ,  $SL=214\text{dB}$ ,  $T=4\text{ms}$ ,  $B=15\text{KHz}$
- Portée ADCP NB CW  $\approx 431\text{m}$  (à  $SL\ 200\text{dB}$ :  $308\text{m}$ )
- LB FM  $\approx 452\text{m} < \text{portée DVL}$
- Taille case en distance :  $3\text{m}$
- $\text{Sigma\_V}=8\text{cm/s}$  en FM,  $55\text{cm/s}$  en CW

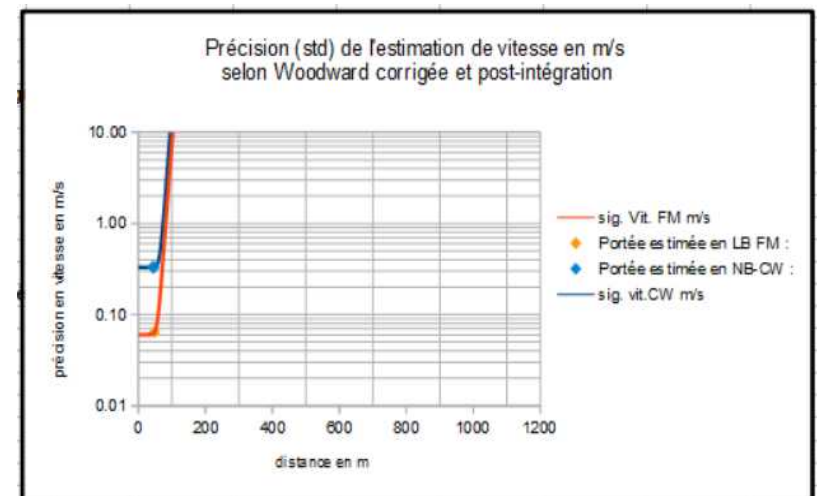
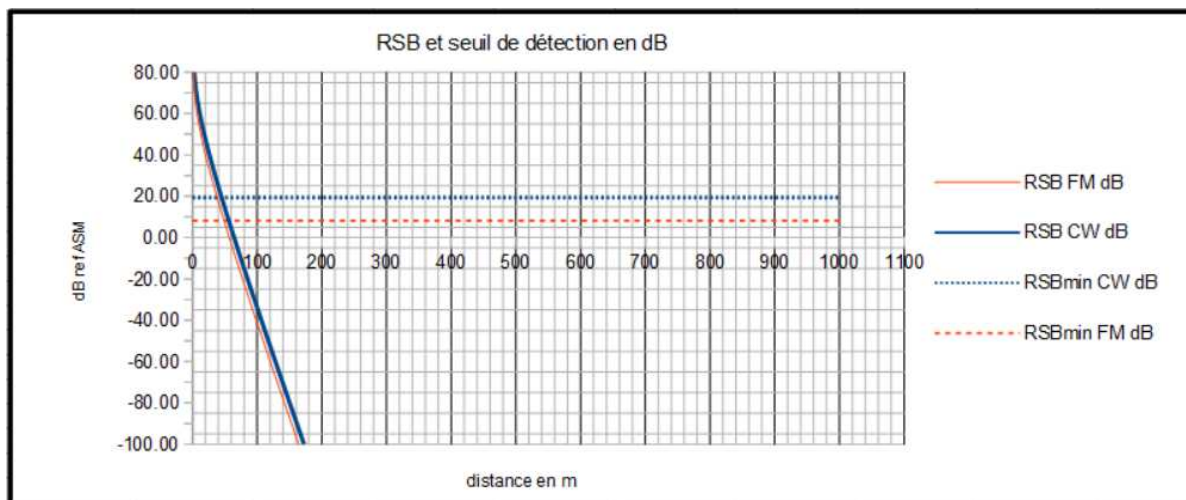


Teledyne RDI Workhorse Long Ranger 150 kHz ADCP					Fo = 150 kHz						
	Depth Cell Size	Std Dev. <sup>1</sup>	First Cell Range <sup>2</sup>	Maximum Range <sup>3,4,5</sup>	2 mode FM à B et B/4		mode haute résolution B	mode basse résolution B/4			
High Resolution	4 m	7.0 cm/s	8.9 m	210 m	T <sub>fm</sub> =T <sub>int</sub> en mode FM		trop fort pour les perf.	en m/s		en m/s	
	8 m	3.5 cm/s	12.8 m	235 m	B <sub>max</sub> =6.5kHz		R <sub>sb</sub> >>1	rsb>>1		rsb>>1	
	16 m	1.8 cm/s	20.6 m	255 m	résol. en m	T ou T <sub>int</sub> en s	σV CW	B supp en kHz	σV FM	B supp en kHz	σV FM
	24 m	1.2 cm/s	28.4 m	270 m	4.00	0.0053	0.41	6.5	0.070	1.6	0.140
Long Range	4 m	14.0 cm/s	8.8 m	275 m	8.00	0.0107	0.21	3.3	0.035	0.8	0.070
	8 m	7.0 cm/s	12.7 m	300 m	16.00	0.0213	0.10	1.6	0.018	0.4	0.035
	16 m	3.6 cm/s	20.5 m	325 m	24.00	0.0320	0.07	0.8	0.013	0.2	0.027
	24 m	2.5 cm/s	28.7 m	340 m							
Bottom Track	N/A	N/A	N/A	540 m							

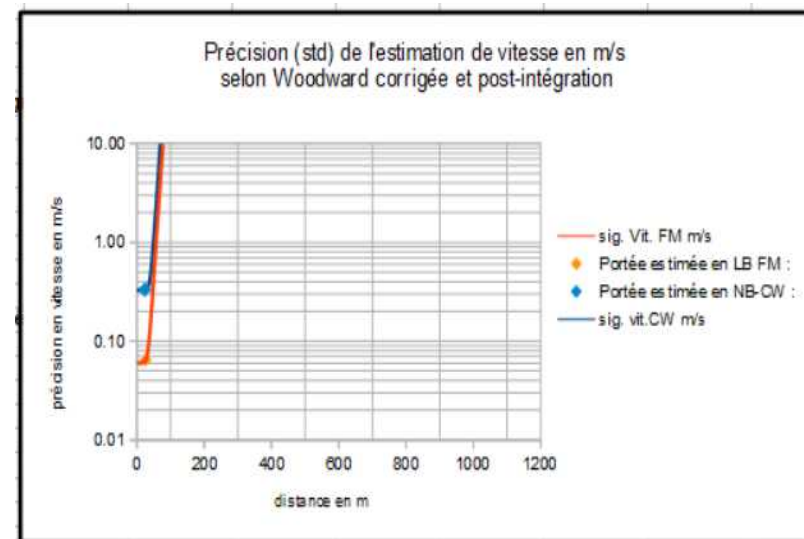
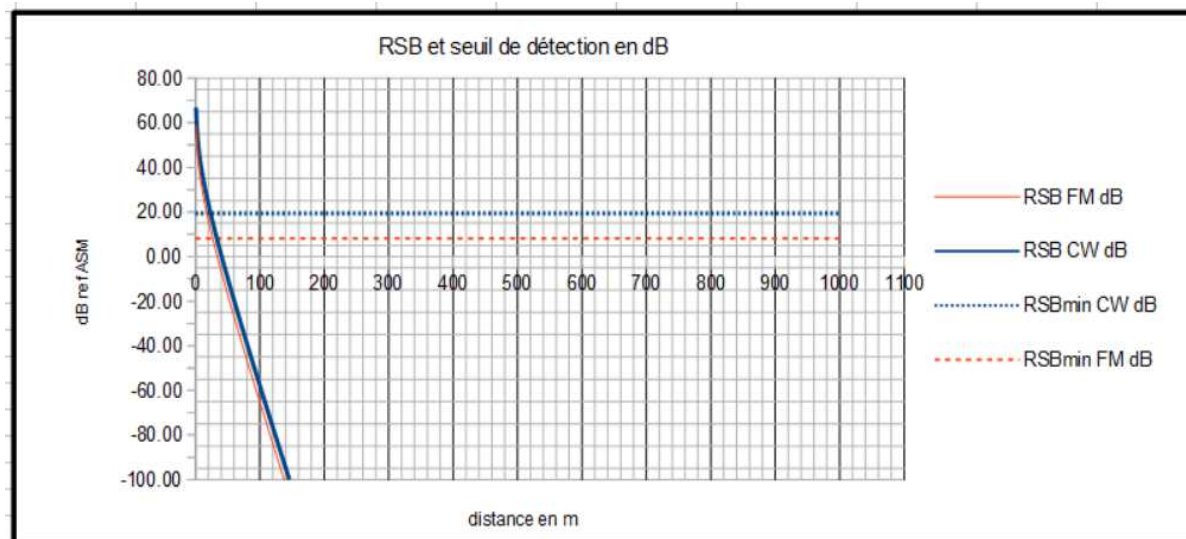
- ADCP type RDI
- $f_0=300\text{KHz}$ ,  $SL=214\text{dB}$ ,  $T=2\text{ms}$ ,  $B=30\text{KHz}$
- Portée ADCP NB CW  $\approx 209\text{m}$  (à  $SL\ 200\text{dB}$ :  $146\text{m}$ )
- LB FM  $\approx 219\text{m} < \text{portée DVL}$
- Taille case en distance :  $1.5\text{m}$
- $\text{Sigma\_V}=8\text{cm/s}$  en FM,  $55\text{cm/s}$  en CW



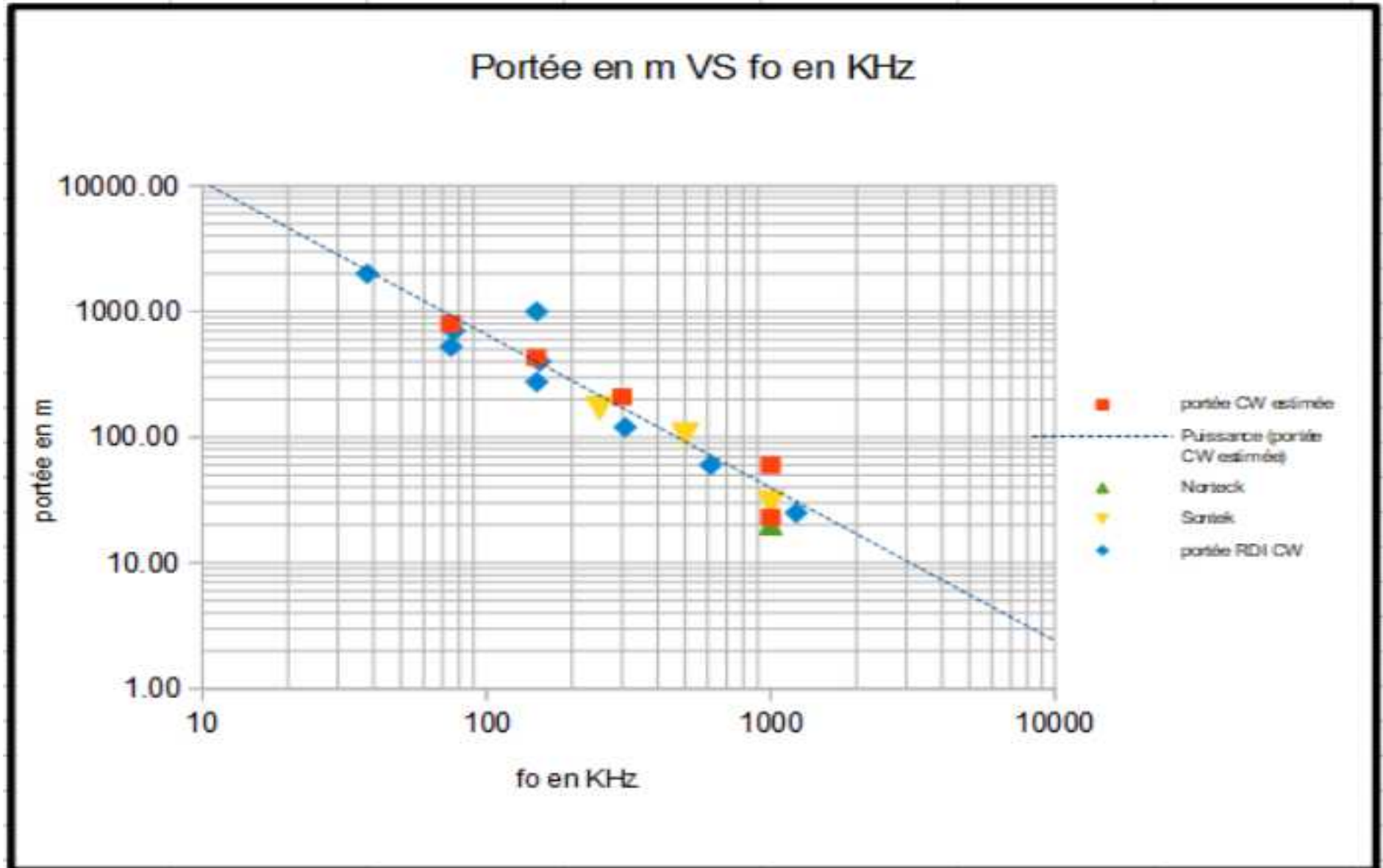
- ADCP type RDI
- $f_0=1\text{MHz}$ ,  $SL=214\text{dB}$ ,  $T=1\text{ms}$ ,  $B=30\text{KHz}$
- Portée ADCP NB CW  $\approx 60\text{m}$  (à  $SL\ 200\text{dB}$ :  $32\text{m}$ )
- LB FM  $\approx 65\text{m} < \text{portée DVL}$
- Taille case en distance :  $0.75\text{m}$
- $\text{Sigma\_V}=7\text{cm/s}$  en FM,  $33\text{cm/s}$  en CW



- ADCP type “low cost”
- $f_0=1\text{MHz}$ ,  $SL=190\text{dB}$ ,  $T=1\text{ms}$ ,  $B=30\text{KHz}$
- Portée ADCP NB CW  $\approx 23\text{m}$
- LB FM  $\approx 27\text{m} < \text{portée DVL}$
- Taille case en distance :  $0.75\text{m}$
- $\text{Sigma\_V}=7\text{cm/s}$  en FM,  $33\text{cm/s}$  en CW



- Portée VS fo





# Conclusion partielle ADCP

Le traitement à large bande :

- améliore  $\sigma_V$  mais fait baisser le SNR.
- est à utiliser s'il y a une “réserve” en SNR et ne peut augmenter portée.
- pour un  $T_{int}$  max fixé, on a intérêt à avoir une impulsion de durée totale  $T=T_{int}$  et à y mettre plusieurs sous-pulses pour ne pas avoir une période d'ambiguïté doppler trop petite
- ...
- Les portées et précisions (std) en vitesse estimées sont globalement en accord avec les portées et précisions affichées par les constructeurs.

Le SL n'est-il pas surestimé ? L'absorption en HF n'est-elle pas sous-estimée ?

Le  $R_v$  de référence est-il de -80dB?



## Quelques questions en suspens :

- FML ou FMH ?
- BPSK (séquence de longueur max) ou Barker ?
- Inventaire des codes effectivement utilisés ?
- Prédiction de la précision en vitesse selon les codes ?
- ...
- 
- Méthode de l'ADCP “low cost” australien ?

# Quelques éléments de bibliographie

- K.S. Miller and M.M. Rochwarger, "A covariance approach to spectral moment estimation", IEEE Transactions on Information Theory, Vol.IT-18, No5, September 1972
- T. Berger and H.L. Groginsky, "Estimate of spectral moments of pulse trains", Proceedings of the International Conference on Information Theory, Tel Aviv, 1973
- K.B. Theriault, "Incoherent multibeam doppler current profiler performance: Part I- Estimate variance, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.OE-11, No 1, 1986
- R. Pinkel, J.A. Smith, "Repeat sequence coding for improved precision of doppler sonar and sodar", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 9, April 1992
- Brumley et al., "Broadband acoustic Doppler current profiler", United States Patent no 5 208 785, May 1993
- GRETSI 97, Grenoble, GK, Recherche de codes optimaux en courantométrie sous-marines large bande, 1997
- JASM 98, Ifremer Brest, GK, Comparaison de quelques méthodes de traitement du signal en courantométrie doppler sous-marine large bande, 1998