

Chapitre 6 - Mesures de vitesse

Il existe deux méthodes principales pour mesurer la vitesse : la méthode lagrangienne et la méthode eulérienne.

a) Mesures lagrangiennes de vitesse

cette méthode consiste à suivre une particule de fluide le long de sa trajectoire.
Voir flotteurs lagrangiens du chapitre 5.

Joseph Louis, comte de Lagrange (en italien Giuseppe Lodovico de Lagrangia), né à Turin en 1736 et mort à Paris en 1813 (à 77 ans), est un mathématicien, mécanicien et astronome.

Son nom figure partout en mathématiques. On lui doit un cas particulier du théorème auquel on donnera son nom en théorie des groupes, un autre sur les fractions continues, l'équation différentielle de Lagrange. En physique, en précisant le principe de moindre action, avec le calcul des variations, vers 1756, il invente la fonction de Lagrange, qui vérifie les équations de Lagrange, puis développe la mécanique analytique, vers 1788. Il élabore le système métrique avec Lavoisier pendant la Révolution. Il est membre fondateur du Bureau des longitudes (1795) avec, entre autres, Laplace et Jean-Dominique Cassini (Cassini IV). Il participe à l'enseignement de mathématiques de l'École normale et est aussi le fondateur de l'Académie de Turin (1758). En mécanique des fluides, il introduit le concept de potentiel de vitesse en 1781, bien en avance sur son temps. Il démontre que le potentiel de vitesse existe pour tout écoulement de fluide réel, pour lequel la résultante des forces dérive d'un potentiel. Dans le même mémoire de 1781, il introduit, en plus, deux notions fondamentales : le concept de la fonction de courant, pour un fluide incompressible, et le calcul de la célérité d'une petite onde dans un canal peu profond. Rétrospectivement, cet ouvrage marqua une étape décisive dans le développement de la mécanique des fluides moderne.

b) Mesures eulériennes de vitesse

Cette méthode consiste à mesurer les courants en un point fixe dans l'espace, exemple avec un courantomètre, voir ci-après.

Leonhard Paul Euler, né en 1707 à Bâle (Suisse) et mort à 76 ans en 1783 à Saint-Pétersbourg (Empire russe), est un mathématicien et physicien suisse.

Euler fit d'importantes découvertes dans des domaines aussi variés que le calcul infinitésimal et la théorie des graphes. Il introduit également une grande partie de la terminologie et de la notation des mathématiques modernes, en particulier pour l'analyse mathématique, comme pour la notion d'une fonction mathématique². Il est également connu pour ses travaux en mécanique, en dynamique des fluides, en optique et en astronomie.

OPB 201 Mesures en Mer | Master Sciences de la Mer 1^{ère} année
Spécialité Physique & Biogéochimique | Chapitre 6

Pour mesurer la vitesse qui a trois coordonnées :

$$\vec{V} = u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}$$

On ignore souvent la coordonnée verticale w et on mesure U et θ

$$u\vec{i} + v\vec{j} = U(\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j})$$

* Mécanismes pour mesurer U:

Les courantomètres (a,b) sont mécaniques ; les courantomètres (c,d,e,f) ne sont pas considérés comme mécaniques.

*La direction du courant horizontal θ est mesurée par un dispositif annexe (dérive, etc) ou en combinant plusieurs mesures dans des directions non parallèles. Cela donne la mesure du courant par rapport à l'instrument (référentiel du capteur).

Il faut aussi connaître l'angle de l'instrument par rapport au Nord magnétique. Donc, en plus, il faut aussi un compas interne pour mesurer l'orientation de l'instrument par rapport au nord

Cette mesure n'est pas aussi évidente qu'on pourrait le croire à cause de problèmes tels que les connections du compas ; fiabilité ; correction des effets de déclinaison du Nord magnétique / Nord géographique... [note : impossible à utiliser au dessus des pôles]

1) Historique

1930 premières mesures avec le courantomètre d'Ekman (Ekman 1932)

rotor avec messager (1 début, 1 fin)

boules roulant dans un cylindre, mesurant la direction

Profile de 10 à 100 m fait en 30 mn

1960 US (rotor de Savonius) et France (torpille à hélices)

1960 Norvège courantomètre Aanderaa (contrat OTAN) ; voir après

1970 Japon courantomètre acoustique

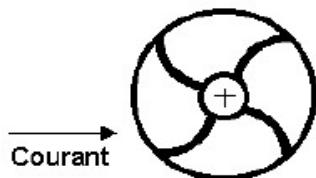
2) Courantomètres à rotor

Le rotor initialement constitué de 6 pales incurvées en formes de coupelles dont l'axe de rotation est orienté perpendiculairement à la direction principale de l'écoulement (voir Figure « Rotor de Savonius »).

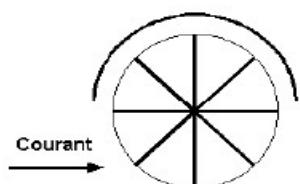
Mais il y avait un problème de sensibilité aux vagues ; du coup, on utilise maintenant des ailettes planes (voir Figure « Panémone »).

La direction est mesurée avec une dérive qui s'oriente librement (voir Figure courantomètre Aanderaa).

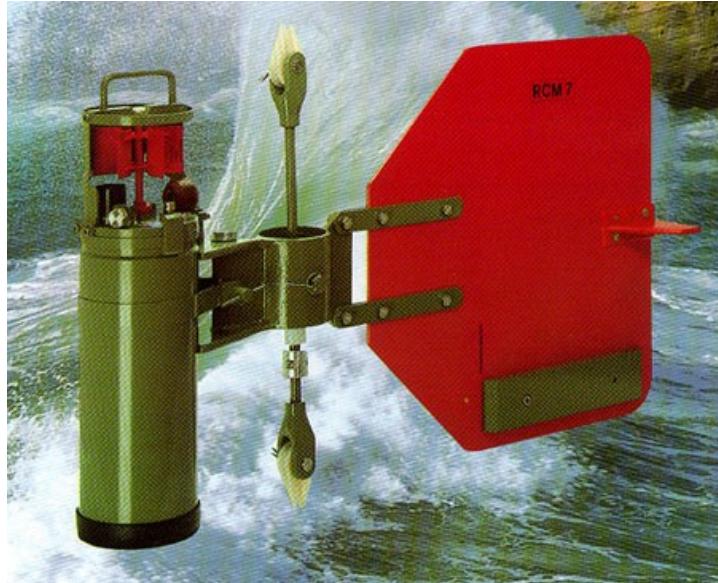
Ex. RCM = Rotor Current Meter



ROTOR DE SAVONIUS



Panémone



Courantomètre Aanderaa

Introduction de l'échantillonnage par « bouffées » (« burst sampling ») [Richardson 1963]
+ Analyse interne des données

L'utilisation de la moyenne VECTORIELLE sur les mesures effectuées par cet instrument a révolutionné les mesures de vitesse.

VACM = Vector Averaging Current Meter commercialisé dans les années 70

Exemple: mesure de l'amplitude pendant 20 s

Mesure du cap au bout de 20 s

Analyse interne des données : calcul de la composante ouest et nord

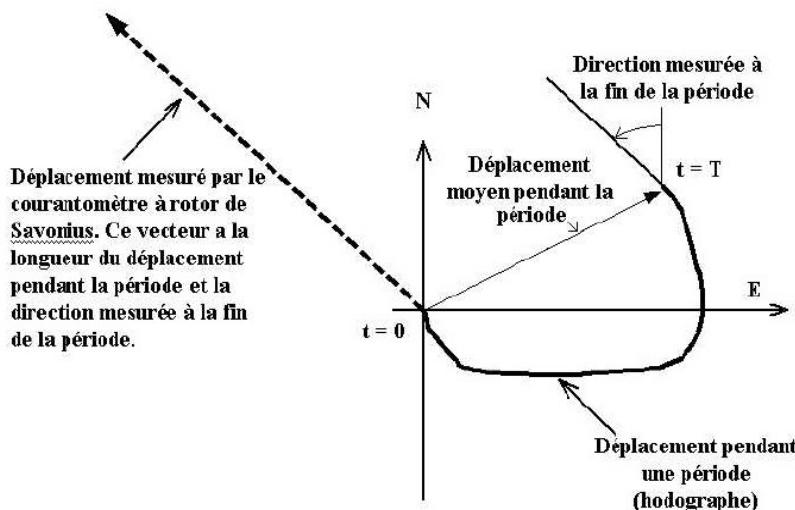
Stockage en mémoire

Tous les Δt (ex 4 à 15 mn), moyenne des n mesures des composantes faites durant Δt

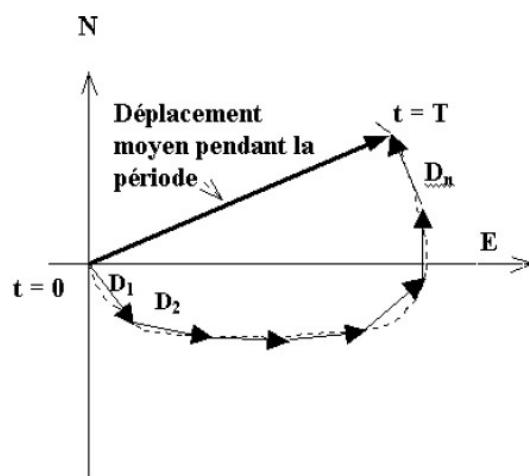
Ex. Courantomètre « Aanderaa » (marque); courantomètre encore utilisé de nos jours

Echantillonnage par « bouffées » (« burst sampling ») + mesures vectorielles

Figure suivante illustrant la **différence entre les mesures faites par un courantomètre Aanderaa et un courantomètre à rotor** (extraite du cours de Girardot 2003).



Déplacement réel, moyen et mesuré pendant une période de mesure.



Approche du déplacement moyen pendant une période (somme vectorielle)

Note Il est possible aussi de faire un calcul interne de l'écart-type ce qui renseigne sur la variabilité haute fréquence des courants.

OPB 201 Mesures en Mer	Master Sciences de la Mer 1 ^{ère} année Spécialité Physique & Biogéochimique	Chapitre 6
------------------------	--	------------

3) Courantomètres Acoustiques

3 a - Courantomètres Acoustiques Non Doppler

Ces courantomètres mesurent la vitesse le long d'un axe par différence de temps entre le trajet d'une onde sonore entre 1 émetteur (E) et 1 récepteur (R).

Les ondes acoustiques sont émises sous forme de pulse acoustique de haute fréquence (Mega hertz).

Ex 1 paire E/R

V vitesse du courant dans la direction E/R

Vitesse du pulse = $c + V$

Le son met t_1 pour parcourir la distance L: $(V+c) * t_1 = L$

On en déduit la vitesse du courant: $V = L/t_1 - c$

3b - Courantomètres Acoustiques Doppler

L'effet Doppler (ou effet Doppler-Fizeau) désigne le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Si on désigne de façon générale ce phénomène physique sous le nom d'effet Doppler, le terme d'« effet Doppler-Fizeau » est réservé aux ondes électromagnétiques.

Cet effet fut présenté par Christian Doppler en 1842 dans l'article « Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres astres du ciel », confirmé sur les sons par le chercheur néerlandais Buys Ballot (en utilisant des musiciens jouant une note calibrée sur un train de la ligne Utrecht-Amsterdam), et fut également proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848.

* Principe de l'effet Doppler acoustique

Le son est produit par des variations de pression dans les milieux solides, liquides ou gazeux. Les ondes sonores sont comparables à des vagues. Imaginez-vous sur un bateau au mouillage. Les vagues sont perpendiculaires à l'axe du bateau. Vous voyez passer, par exemple, x vagues en dt secondes. Maintenant si le bateau fait route dans la direction d'où viennent les vagues, durant le même temps dt, vous verrez passer plus de vagues y>x. La fréquence des vagues vous semblera plus élevée. En allant dans la direction opposée, vous verrez moins de vagues y<x, la fréquence vous semblera plus basse. C'est ce qu'on appelle effet Doppler.

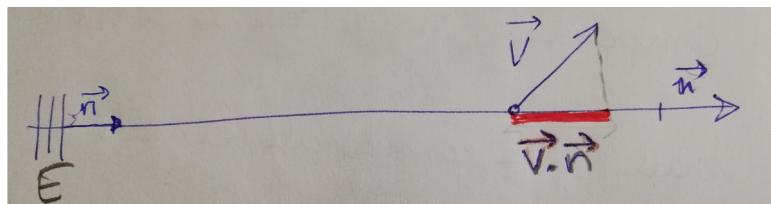
Au lieu de regarder des vagues, on écoute une source sonore qui émet un son pur de fréquence F. L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence. Le son est différent selon que l'on se trouve à l'intérieur du véhicule (l'émetteur étant alors immobile par rapport au récepteur), ou que le véhicule se rapproche du récepteur (le son étant alors plus aigu) ou s'en éloigne (le son étant plus grave) (écouter la reconstitution du passage d'une voiture sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Doppler).

Si c est la célérité du son, F la fréquence de l'onde sonore émise par la source et V la vitesse relative entre source et émetteur, le décalage de fréquence est noté $\Delta F = FV/c$ formule simplifiée (voir formule plus rigoureuse par la suite).

Il faut cependant remarquer que la variation de la fréquence du son dans les derniers exemples est non seulement due à la vitesse relative du véhicule en mouvement par rapport à la position de l'observateur (fixe si hors du véhicule), mais plus précisément à sa vitesse relative radiale, i.e. dépendant aussi de la direction de cette vitesse par rapport à la direction source (véhicule)/récepteur (observateur), appelée ligne de visée.

Si on prend un autre exemple où la source est pour le moment fixe (Emetteur) et envoie un signal vers un élément Récepteur en mouvement. La ligne de visée est la droite entre l'Emetteur (Source) et le Récepteur.

La formule précédente varie suivant l'angle θ , angle défini entre la ligne de visée (de direction le vecteur unitaire \vec{n}) et le vecteur vitesse \vec{V} du Récepteur. Du coup la formule exacte de la fréquence Doppler est en fait : $\Delta F = F \frac{-\vec{V} \cdot \vec{n}}{c}$



Il y a donc modulation par $\cos(\theta)$ quand le vecteur vitesse n'est pas colinéaire avec la direction de la ligne de visée puisque $\vec{V} \cdot \vec{n} = V \cos(\theta)$.

Si le Récepteur mobile se déplace orthogonalement au son propagé, il n'y a normalement pas de décalage de fréquence.

Si le mobile s'éloigne colinéairement dans la direction du faisceau $\vec{V} \cdot \vec{n} = V$, donc $\Delta F = -FV/c$ est négatif (son plus grave).

Si le mobile s'approche colinéairement avec le faisceau, $\Delta F = FV/c$ est positif (son plus aigu).

Mesure du courant par effet Doppler

Dans un premier temps, un transducteur émet, suivant un axe, un certain train d'ondes acoustiques de fréquence F appelée « ping ». Peu de temps après, ce même transducteur écoute l'écho qui lui revient. Cet écho est du à la réflexion de l'onde sur des particules en suspension dans l'eau (ou rétrodiffusion). Si la particule est immobile, elle renvoie un signal de même fréquence que le signal d'origine. Si un courant marin éloigne la particule, la fréquence du signal de retour baisse ; si le courant marin approche la particule, la fréquence du signal de retour augmente. Dans les deux cas, le signal de retour est lui aussi affecté par un effet Doppler du coup la fréquence est doublement décalée ; et la formule finale est la suivante :

$$\Delta F_2 = 2F \frac{-\vec{V} \cdot \vec{n}}{c}$$

ce qui permet d'obtenir la vitesse radiale du courant dans la direction du faisceau :

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = \frac{-\Delta F_2 c}{2F}$$

La limitation majeure est que le résultat dépend de la valeur de la célérité, pas forcemment connue sur toute la colonne d'eau.

Mesures des profiles de courant par effet Doppler

Le courantomètre à effet Doppler, souvent dénommé par son abréviation anglophone **ADCP** (**Acoustic Doppler Current Profiler**) est un appareil basé sur l'effet Doppler capable d'enregistrer un profil des vitesses et directions du courant.

Un ADCP comporte des transducteurs piezoélectriques qui transmettent et reçoivent les signaux acoustiques. Le temps de voyage du signal permet d'estimer la distance d'une mesure. Le décalage en fréquence des échos reçus est relié à la vitesse de l'eau dans l'axe du faisceau acoustique. Pour mesurer la vitesse de l'eau en 3D, au moins trois faisceaux sont nécessaires. Les appareils comportent souvent 4 faisceaux pour permettre une redondance des mesures.

Dans les années récentes, de nouvelles fonctionnalités se sont ajoutées aux ADCPs (notamment la mesure des vagues ou de la turbulence) ce qui fait qu'on peut trouver des profileurs à 2, 3, 4, 5 ou même 9 faisceaux.



courantomètre ADCP à 4 faisceaux

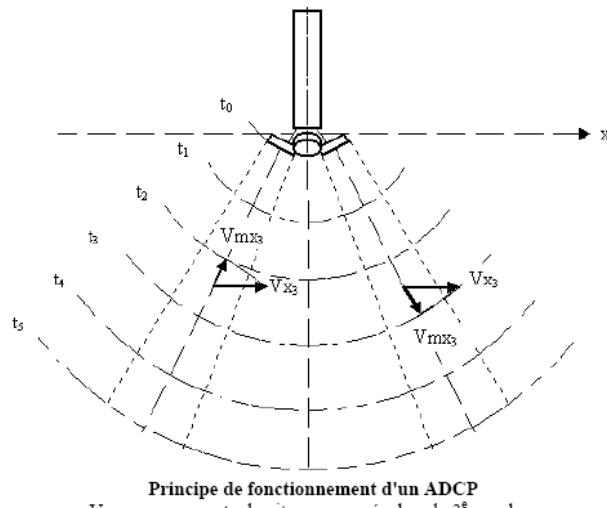


courantomètre ADCP Sentinel à 5 faisceaux (Mars 2022 avec C. Comby)

Le courantomètre ADCP peut être utilisé sous forme d'appareillage fixe autonome (fixé au fond avec une cage, ou sur une bouée) ou bien être embarqué à bord d'un navire. Le signal ultrasonore émis vers le haut (si courantomètre immergé au fond) ou vers le bas (si courantomètre de surface) est rétrodiffusé par les microparticules contenues dans l'eau, puis capté par des transducteurs, ex disposés en croix comme image ci-dessous (ou en réseau pour ADCP dernière génération).

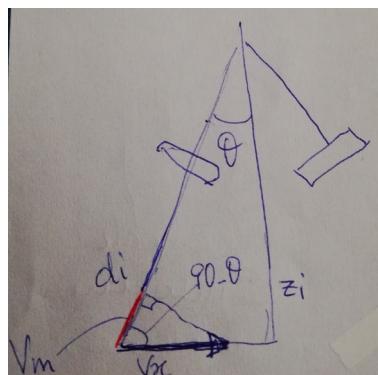
V_{xi} composante x du courant océanique dans la couche i

V_{mx_i} composante x du courant de la couche i mesurée par un faisceau. C'est la projection de V_{xi} dans la direction de visée du faisceau acoustique (on note que, suivant le faisceau, cette V_{mx_i} peut aller vers le transducteur ou s'en éloigner)



Par la suite, en exemple, est présenté le système de fonctionnement des ADCP de RDI (Research Development Instruments) à 4 faisceaux. Le profileur a quatre transducteurs (= dalles acoustiques) inclinées d'un angle θ par rapport à la verticale (en général $\theta=30^\circ$ pour les ADCP RDI mais on trouve d'autres angles chez d'autres fournisseurs ex 20°).

Le profileur émet simultanément un ping sur ces 4 transducteurs. Il écoute ensuite le signal écho, qui a rétrodiffusé sur les particules en mouvement (avec l'hypothèse que les particules sont en mouvement de façon passive si on veut mesurer les courants) dans la colonne d'eau.



Rappel: V_{mx_i} composante x du courant de la couche i mesurée le long de la ligne de visée du faisceau (alors que V_{xi} est composante x du courant océanique dans la couche i)

Par trigonométrie, avec α complémentaire à 90° de θ (si $\theta = 30^\circ$ alors $\alpha = 60^\circ$), on a

$$\cos(\alpha) = \frac{V_{mx_i}}{V_{x_i}}$$

$$V_{xi} = (1/\cos 60^\circ) * V_{mx_i}$$
AN $V_{xi} = 2 V_{mx_i}$ ($\cos 60^\circ = 1/2$)

Cette mesure est faite à une distance moyenne oblique « di » du transducteur, soit à une distance verticale suivant Oz de:

$$z_i = (\cos \theta) di \quad \text{AN } z_i = (\cos 30^\circ) di = \sqrt{3}/2 di = 0,86 di$$

La distance parcourue est liée au temps de retour du signal rétrodiffusé car le son parcourt cette distance à la vitesse c (célérité du son). On étudie, pour la couche z_i , tous les signaux revenant entre le temps t_i et t_{i+1} , donc le temps moyen du signal de retour est $(t_{i+1} - t_i)/2$

Il en découle que la distance d_i est parcourue deux fois pendant ce temps moyen:

$$2d_i = c \cdot (t_{i+1} - t_i)/2$$

$$\text{donc } d_i = c (t_{i+1} - t_i)/4$$

$$\text{ou } z_i = (\cos 30^\circ) d_i = (\cos 30^\circ)c (t_{i+1} - t_i)/4$$

Trois directions sont nécessaires pour avoir un vecteur de vitesse 3D (u, v, w). L'ADCP a 4 faisceaux acoustiques. En fait, il détermine les 3 composantes du vecteur vitesse et un critère de qualité (ou il fait les calculs des courants horizontaux par couple de faisceaux opposés et les compare pour vérifier la qualité de la mesure).

Attention la composition vectorielle n'est pas une combinaison de composantes perpendiculaires entre elles mais une combinaison trigonométrique plus complexe.

L'hypothèse a été faite que le courant est identique dans une tranche d'épaisseur dz , malgré la distance horizontale séparant les 4 cellules des 4 faisceaux. Il peut y avoir des problèmes éventuels pour les cellules les plus éloignées de l'émetteur (la distance entre les cellules augmentant avec la distance au transducteur); mais ce problème est généralement détecté par l'analyse systématique du critère de qualité.

« *Zones d'ombre* » (Figure, page suivante, gauche)

Raison a) Après chaque ping, les transducteurs continuent de résonner pendant un temps ce qui fait qu'il n'est pas possible d'obtenir de mesures près de l'appareil. Le temps que prennent les transducteurs pour arrêter complètement de vibrer après l'envoi du signal mais avant d'écouter les échos détermine la taille de la « zone d'ombre » près du profileur, à l'intérieur de laquelle aucune mesure de courant n'est possible.

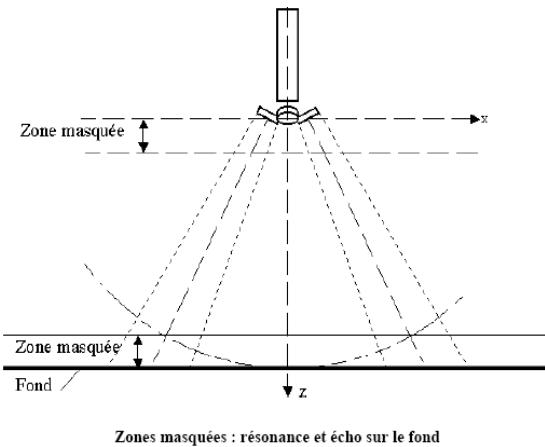
Cette « zone d'ombre » est évidemment proche de l'appareil.

Raison b) Les transducteurs sont directs; une faible énergie est cependant émise dans les autres directions notamment suivant l'axe vertical Oz de l'ADCP. Si l'ADCP est à la surface regardant vers le fond, alors le ping est réfléchi par le fond et le signal de retour est assez fort pour masquer celui des courants proches du fond. Dans une couche de fond d'une hauteur h (distance entre l'ADCP et le fond), une zone d'ombre de hauteur $\sim 15\% h$ est affectée.

Ce 15 % est une valeur arrondie provenant de la valeur exacte qui est égale à $1-\cos 30^\circ$ car il faut retirer à la hauteur verticale totale h la projection de h du faisceau sur la verticale, donc : $h - h \cos 30^\circ = h(1-\cos 30^\circ)$, facteur $1-\cos 30^\circ$ dont la valeur numérique est $1-0,86 = 0,134$.

Dans cette zone, le courant n'est pas mesurable. Il en est de même à la surface si l'appareil est positionné en profondeur et regarde vers le haut et qu'un écho important est produit par la surface.

Pour certains appareils, cette zone d'ombre, près du fond, pour un ADCP orienté vers le bas, ou près de la surface pour un ADCP orienté vers le haut, la hauteur de cette zone d'ombre est réduite à 6 à 12% de la colonne d'eau.



Fréquence en kHz	Portée en m	Diamètre transducteur
76.8	400	280 mm
153.6	240	165 mm
307.2	120	133 mm
614.4	60	101 mm
1228.8	25	54 mm

En fait, la dimension «orthoradiale» du volume diffusant de chaque cellule est fixée par l’ouverture angulaire du lobe acoustique du transducteur. Donc la dalle céramique de chaque transducteur a un certain diamètre qui est fonction de la fréquence de l’onde (voir tableau ci-dessus, colonne de droite).

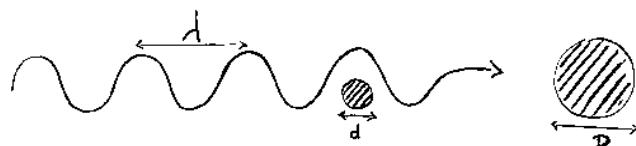
Plus la fréquence est élevée, plus la dalle peut être petite. On remarque aussi que **plus la fréquence est élevée, plus la portée est faible.** En effet, les basses fréquences se propagent beaucoup mieux dans l’eau que les hautes fréquences car elles sont moins absorbées.

ANNEXES

Supplément : Rétrodiffusion

L’amplitude du signal rétrodiffusé peut apporter des informations autres que la vitesse du courant. En effet ce signal rétrodiffusé donne une information sur la taille des particules rétrodiffusantes.

Le signal émis possède une longueur d’onde propre λ qui va déterminer la taille minimale des obstacles détectés. En effet, le croquis suivant montre bien que l’obstacle de dimension d ne renvoie pas le signal comme le fera celui de dimension D . **Un signal de longueur d’onde λ ne pourra détecter que des obstacles de dimensions au moins égales à λ .**



Cette longueur d’onde est reliée à la fréquence d’émission par la formule suivante :
 $\lambda = c / F$ où λ est la longueur d’onde (m), c la célérité (m/s) et F la fréquence (Hz).

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de valeurs pour fixer les idées :

c (m/s)	F (kHz)	λ (cm)
1500	12	12.5
	38	3.9
	120	1.25
	200	0.75
1550	12	12.9
	38	4.07
	120	1.29
	200	0.77

Un organisme de moins de 2cm n'est pas "vu" par le 38 kHz, mais est détecté avec le 120 ou le 200 kHz . Un banc de sardine n'est pas vu par le 38 kHz. Par contre il est inutile d'utiliser du 200 kHz pour détecter ce banc de sardine car le signal de retour sera parasité par tous les autres poissons de taille plus petite.

Une autre façon de présenter ce tableau suit :

TAILLE DE LA CIBLE	12 kHz $\lambda = 12.5$ cm	38 kHz $\lambda = 3.9$ cm	120 kHz $\lambda = 1.25$ cm	200 kHz $\lambda = 0.75$ cm
20 cm	OUI	OUI	OUI	OUI
10 cm	NON	OUI	OUI	OUI
3 cm	NON	NON	OUI	OUI
1 cm	NON	NON	NON	OUI
0.5 cm	NON	NON	NON	NON

De plus, une autre caractéristique du signal doit être prise en compte : la portée ! En effet, comme mentionné précédemment, les basses fréquences se propagent beaucoup mieux dans l'eau que les hautes fréquences. Le choix de la fréquence d'émission repose alors sur un compromis entre la portée et la résolution spatiale : les hautes fréquences détectent des petits organismes sur des courtes distances tandis que les basses fréquences ne verront que les gros organismes mais sur de longues distances...

Supplément Nouvelle technologie d'ADCP

ADCP avec transducteur-réseau en phase

Les transducteurs ADCP sont conçus et fabriqués de telle sorte que les faisceaux sont transmis à l'angle approprié. Cela est nécessaire pour être en mesure de calculer correctement les composantes horizontales et verticales de vitesse. RDI fabrique deux types d'assemblages de transducteurs pour ADCP: un transducteur de piston avec 4 dalles céramiques individuelles orientées à des angles fixes spécifiques, et un transducteur-réseau en phase avec une dalle de céramique unique. Ces deux types de transducteurs produisent simultanément 4 faisceaux acoustiques à des angles fixes, spécifiques, mais le réseau phase crée tous les faisceaux électroniquement à partir d'une seule ouverture, au lieu de partir de 4 ouvertures séparées. **Un avantage important est la taille globale fortement réduite du transducteur unique** -à une certaine fréquence particulière- comparée à quatre transducteurs de piston indépendants. Cette comparaison de la taille est démontrée sur les figures ci-dessous. De plus il s'avère que **les composantes horizontales de la vitesse mesurées par le transducteur-réseau en phase sont indépendantes des variations de la vitesse du son dans la colonne d'eau**. Cette technologie remplace donc progressivement les anciens modèles d'ADCP.

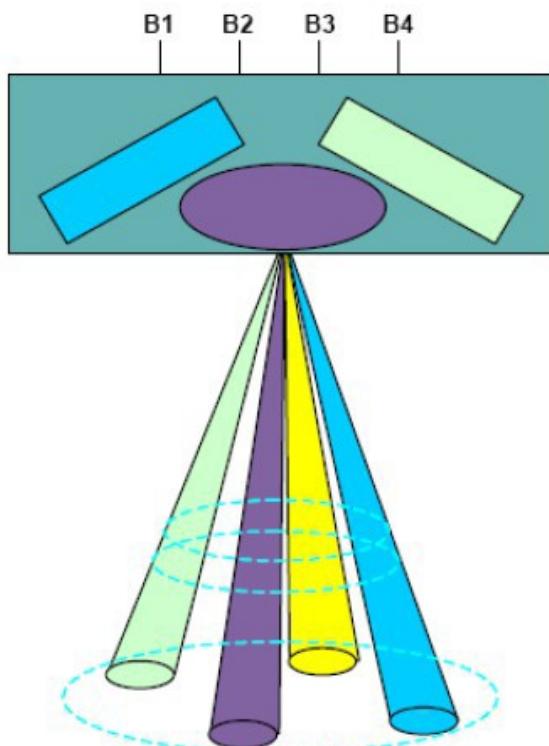
Exemple de la taille comparative des deux ADCP pour une fréquence de 600kHz ci-dessous



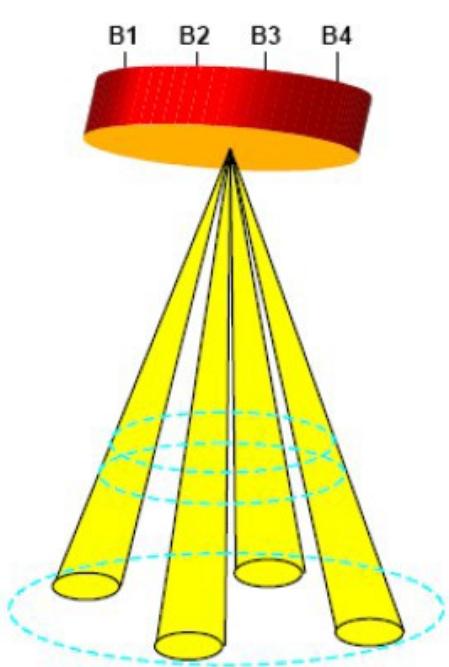
(Courtesy, RDI Primer, 2011)

MULTI-PISTON ARRAY

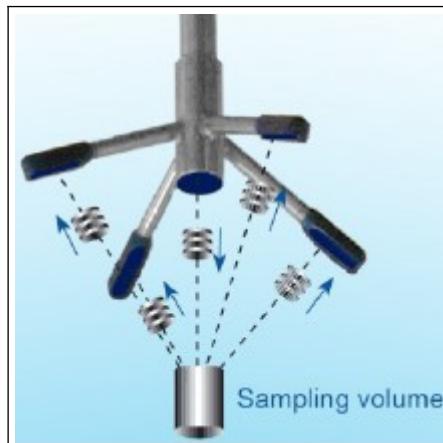
Height = 3
Face area = 5
Volume = 10

**2-D PLANAR ARRAY**

Height = 1
Face area = 1
Volume = 1



A gauche 4 dalles (avec 4 faisceaux correspondants : vert, jaune, bleu, violet) ; à droite 4 faisceaux (tous jaunes) issus d'une dalle unique (ADCP réseau de phase) avec gain de place en hauteur, surface et volume.

Autres sortes de courantomètres effet Doppler

Velocimetre Doppler acoustique

(type Vectrino, conçu par l'entre prise Nortek ; Nortek 2013)

Le principe de base est le même que précédemment sauf que les **4 émissions sont non jointes de façon à viser un même volume d'échantillonnage**

Mesures de courant par radar

La mesure radar HF/VHF est basée sur l'interaction de l'onde électromagnétique émise par le radar et la surface de la mer selon le mécanisme de diffraction cohérente de Bragg (Barrick, 1972). L'écho radar est composé de deux raies spectrales disposées de part et d'autre de la fréquence d'émission du radar, associées aux portions du signal réflechies sur les vagues qui se rapprochent (décalage Doppler positif) et s'éloignent (decalage Doppler négatif) du radar.

La présence des courants modifie la position de ces raies en introduisant un décalage Doppler supplémentaire (Barrick, 1972). Ce décalage supplémentaire des deux raies de Bragg de 1er ordre est utilisé pour déterminer les courants de surface tandis que le contenu spectral aux autres fréquences, le "spectre du 2nd ordre", est utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques de l'état de mer : hauteur significative, période dominante... (Hasselmann 1971, Broche et al, 1983).

Bref bibliographie :

Barrick, D.E.,1972: Remote Sensing of Sea State by Radar, Chapter 12 of Remote Sensing of the Troposphere. V.E. Derr, Editor, NOAA/Environmental Research Laboratories, 12.1-12.6.

Broche P., J. C. De Maistre and P. Forget, 1983: Mesure par radar decamétrique coherent des courants superficiels engendrés par le vent. Oceanologica Acta, 6, 43-53.

Hasselmann, K., 1971: Determination of Ocean-Wave Spectra from Doppler Radio Return from the Sea Surface. Nature, 229, 16-17.