



LOCEAN
LABORATOIRE D'OCÉANOGRAPHIE ET DU CLIMAT :
EXPÉRIMENTATIONS ET APPROCHES NUMÉRIQUES

UNITÉ MIXTE DE RECHERCHE 7159
CNRS / IRD / UNIVERSITÉ PIERRE & MARIE CURIE / MNHN
INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE



Institut
**Pierre
Simon
Laplace**

Intercomparaison de courantomètres en bassin de traction

Rapport d'essais et exploitation des résultats

août 2005



LOCEAN
LABORATOIRE D'OCÉANOGRAPHIE ET DU CLIMAT :
EXPÉRIMENTATIONS ET APPROCHES NUMÉRIQUES

UNITÉ MIXTE DE RECHERCHE 7159
CNRS / IRD / UNIVERSITÉ PIERRE & MARIE CURIE / MNHN

INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE



Institut
**Pierre
Simon
Laplace**

Intercomparaison de courantomètres en bassin de traction

Plan du rapport

- **Résumé et Conclusions**
- **Chapitre 1 : Compte rendu d'essais au bassin**
- **Chapitre 2 : Calibration des courantomètres Aquadopp**
- **Chapitre 3 : Calibration des courantomètres Aanderaa**
- **Annexe 1 : Exploitation des données Aanderaa en coordonnées terrestres**
- **Annexe 2 : Estimation des vitesses chariot**

Hervé Le Goff
10/08/2005

Tout commentaire critique sur ce rapport est bienvenu : legoff@lodyc.jussieu.fr

Résumé et conclusions

Ce rapport traite des essais effectués les 10 et 11/03/2005 au Bassin d'Essai des Carènes de la DGA à Val de Reuil (27) afin de comparer les mesures de courantomètres mécaniques (à rotor) et acoustiques (Doppler) entre eux et avec les vitesses du chariot de traction du bassin, prises comme référence.

Nous tenons à remercier vivement la DGA, les responsables et personnels techniques du bassin pour l'aide qu'ils nous ont apportée.

I- Conditions expérimentales

I-1 Bassin

- Le B600 est un bassin de 545m de long, 15m de large, 7m de profondeur. Le chariot de traction a permis d'explorer le domaine de vitesse [0, 100cm/s] par paliers à vitesse constante (5, 10, 25, 50, 75, 100 cm/s), avec une précision de 0.008cm/s sur les moyennes de référence palier (vitesses chariot).
- La rétro diffusion de l'eau (douce) du bassin pour les signaux Doppler était très pauvre : la valeur moyenne du rapport (signal/bruit de fond Doppler) était de 10 db.
- L'environnement magnétique du bassin était très hétérogène : on a constaté des écarts de 30° sur les signaux des compas Aquadopp échantillonnés à 1 hz, au cours des déplacements du chariot.

I-2 Montage et configuration des courantomètres

Nous avons testé 5 courantomètres : 2 Aanderaa RCM7 (courantomètre mécanique à rotor) et 3 Nortek Aquadopp 2000m (courantomètre acoustique à effet Doppler)

Les configurations apparaissent dans le tableau suivant.

référence	AQ1	AAD1	AQ2	AAD2	AQ3
Instrument	Nortek Aquadopp	Aanderaa RCM7	Nortek Aquadopp	Aanderaa RCM7	Nortek Aquadopp
Montage (vertical, tête en bas)	Fixe sur tube	Fixe sur tube	Sur girouette et cable	Fixe sur tube	Fixe sur tube
coordonnées	Terrestres ENU	Module + cap	Instrument XYZ	Module + cap	Instrument XYZ
échantillonnage	3s	30s	3s	30s	3s

Tous les courantos ont été montés sur supports amagnétiques, les lignes de foi ont été calées à vue, à 2° près dans l'axe du bassin.

Aux grandes vitesses, des vibrations structurelles ont parfois bruité les mesures des courantomètres fixes.

Sur chaque palier de vitesse, les Aquadopps ont effectués en moyenne 150 échantillons à 3s et les Aanderaas 15 échantillons à 30s.

II- Résultats

II-1 Traitement des données

Pour chaque courantomètre, nous avons extrait depuis les fichiers bruts les séries correspondant à chaque palier de vitesses constantes. Nous y avons calculé une moyenne de palier avec écart-type et intervalle de confiance (au niveau 0.01), pour chaque composante du vecteur vitesse (terrestre ou instrument selon la configuration du courantomètre).

Nous en avons déduit le module et l'azimut du vecteur moyen sur chaque palier. Le module a été corrélé aux moyennes palier des vitesses chariot prises comme référence. Nous avons finalement établi pour chaque courantomètre une droite de calibration sur ces vitesses chariot, avec précision et domaine de confiance.

Remarque : pour les 2 Aanderaas, un traitement direct du module (vitesse rotor) a également été effectué pour évaluer l'influence du bruitage magnétique (signaux compas) sur la précision des mesures.

II-2 Modules des vecteurs moyens de paliers

Des tests d'hypothèse ont mis en évidence de légers biais expérimentaux :

- sur les Aquadopps, ils sont tous expliqués par les conditions de mesure (vibrations, sillage)
- sur les Aanderaas, c'est la non linéarité des rotors aux grandes vitesses (alors que la calibration constructeur/IFREMER est linéaire) qui induit une erreur de +4%.

Pour tous les courantomètres nous avons calculé des régressions linéaires du type :

$$U_{\text{chariot}} = a.U_{\text{couranto}} + b$$

avec (b) forcé à zéro car les mesures à vitesse nulle ne sont pas significatives et les autres biais sont identifiés et faibles.

Les résultats statistiques de ces corrélations apparaissent dans le tableau suivant :

couranto	constante a	R^2	erreur type (cm/s)	précision sur module [5,10cm/s] (cm/s)	précision sur module [10,100cm/s] (cm/s)
AQ1 (ENU)	1,0265	0,9992	1,0	1	1
AQ2 (XYZ)	1,0058	0,9999	0,3	0.8	0.7
AQ3 (XYZ)	1,0019	0,9992	0,9	0.8	0.7
AAD1 (EN)	0,9996	0,9987	1,2	8%	6%
AAD2 (EN)	0,9964	0,9985	1,2	10%	8%
AAD1 (module)	0,9847	0,9996	0,7	0.4	0.5
AAD2 (module)	0,9700	0,9996	0,7	0.4	0.5

Commentaires sur le tableau

- dans tous les cas les corrélations sont très significatives et l'erreur-type de prédiction reste inférieure à 1.2cm/s.
- pentes : les Aquadopps sous-estiment légèrement les vitesses, les Aanderaa les surestiment. (non linéarité des rotors aux grandes vitesses)

Comparaison des précisions Aquadopp aux données constructeur

Pour nos configurations d'échantillonnage, l'algorithme Nortek de prédiction donne pour la précision des moyennes palier des composantes horizontales:

$$\Delta U_{horizontal} \approx \pm 0.2 \text{ cm/s}$$

Ce calcul ne prend en compte que l'erreur instrumentale (Doppler).

La précision de nos mesures est de 3 à 4 fois inférieure. Justification possible :

- pour AQ2 (pivot, coordonnées XYZ), c'est la faible echo-intensité du signal qui bruite les mesures Doppler, surtout aux basses vitesses.
- Pour AQ3 (fixe, coordonnées XYZ), s'ajoute en plus du bruit Doppler le bruit dû aux vibrations de structures aux grandes vitesses, et à la turbulence de sillage lors des retours chariot.
- Pour AQ1 (fixe, coordonnées ENU), s'ajoute aux bruits précédents le bruit du compas, dû à l'environnement magnétique hétérogène

Comparaison des précisions Aanderaa aux données constructeur

La précision constructeur est donnée à :

$$\Delta U \approx \pm 1 \text{ cm/s} \quad \text{ou} \quad \Delta U \approx \pm 4\% \times U$$

Pour les valeurs de modules directement calculées à partir des vitesses de rotors, nos précisions sont 2 fois meilleures que les valeurs constructeur, certainement grâce à la fréquence d'échantillonnage maxi utilisée.

Pour les modules calculés à partir des composantes, donc faisant intervenir le signal compas très bruité, nos précisions (6 à 10%) sont 2 fois inférieures à ces valeurs constructeur, mais les valeurs moyennes des modules restent exactes et bien corrélées aux vitesses chariot.

II-3 Azimut des vecteurs moyens de paliers

Aquadopps

Dans le domaine [50, 100cm/s], les azimuts des vecteurs moyens sont estimés avec une précision de :

- $\pm 1^\circ$ pour les aquadopps en coordonnées instrument, où n'intervient que la conversion angulaire[beam>XYZ]
- $\pm 3^\circ$ pour l'aquadopp en coordonnées terrestres, où intervient en plus la conversion [XYZ>ENU] qui utilise les signaux compas.

Cette précision se dégrade fortement aux basses vitesses pour les 3 appareils :

$$\text{à } 5 \text{ cm/s } (\pm 17^\circ) \text{ et à } 10 \text{ cm/s } (\pm 5^\circ)$$

Cette dégradation est la signature du bruit Doppler en conditions de faible backscatter.

Nortek annonce $\pm 2^\circ$ pour la précision des compas fluxgate.

Aanderaas

Nous n'avons pas testé d'Aanderaa monté sur girouette, ils étaient fixés solidairement au chariot pour des raisons techniques de montage.

On ne peut donc pas discuter ici de leur résolution angulaire en configuration océanique standard, où c'est la girouette qui se met mécaniquement dans la direction du courant et le signal compas qui récupère cette information angulaire.

On peut seulement conclure que, sur l'ensemble des essais, les 2 compas ont présenté des déviations moyennes de 7°W et 9°W , avec des variations stochastiques à 30s atteignant $\pm 15^\circ$, dues aux perturbations magnétiques des structures du bassin. Le cap *moyenné sur tous les*

runs a été évalué avec une précision de $\pm 4^\circ$, donc sensiblement égale à la précision constructeur ($\pm 5^\circ$ dans le domaine [5, 100cm/s]).

III- Conclusions

Dans nos conditions expérimentales, les 5 courantomètres ont fourni des *estimations exactes* des modules des vitesses horizontales sur le domaine [5, 100cm/s]. Les biais détectés sur certaines mesures sont expliqués et toujours inférieurs à la précision constructeur.

Des corrélations linéaires, avec ordonnée à l'origine nulle, expliquent plus de 99% de la variance sur les modules.

Parmi les aquadopps, l'appareil monté sur girouette est plus précis que ceux en montage fixe. La configuration en coordonnées instrument est plus précise que celle en coordonnées terrestre, au détriment bien sûr d'une perte d'information.

La faiblesse de nos précisions, par rapport aux prédictions du constructeur, s'explique par la très faible rétro diffusion de l'eau, qui bruite les signaux doppler.

Les 2 Aanderaas sont plus précis en module que les Aquadopps (handicapés par le bruit doppler), mais dans les conditions de montage fixe expérimentées, ils ne mesuraient pas l'azimut des vecteurs vitesse.

IV- Prospective

Il est évident que des tests en bassin ne remplacent pas des essais en mer. Notamment, nous avons configuré nos courantomètres sans aucun souci d'autonomie énergétique pour ces tests. Ce qui autorisait des fréquences d'échantillonnage élevées garantissant de bonnes précisions en dépit de conditions extérieures défavorables (backscatter, perturbations magnétiques).

Lors de la campagne océanographique DRAKE (01/2006 à 01/2008), les courantomètres peu profonds (500m) seront doublés sur au moins 4 mouillages : 1 RCM7 et 1 aquadopp 2000, tous deux montés sur girouette et espacés de 2m.

Il est prévu une mesure bi-horaire sur 2ans, nous aurons donc là une excellente source d'intercomparaison en conditions réelles.

L'Aanderaa effectuée, par défaut, 100 échantillons sur 120mn, il offrira théoriquement une précision instrumentale sur le module 1.4 fois meilleure que celle des mesures paliers au bassin (0.5 cm/s pour 50 échantillons à 12s (*pas interne*) sur 8mn).

Pour avoir l'autonomie sur sa batterie Lithium, l'aquadopp aura un « averaging interval » de 300s réparti (ou non) sur les 120mn. Pour un rapport (signal/bruit doppler) escompté de 50db (intermédiaire entre les mauvaises conditions bassin à 10db et la valeur optimale Nortek à 90db), il offrira théoriquement une précision instrumentale de 1.3 cm/s sur les composantes horizontales.

Le mode « diagnostic » des aquadopps sera activé (40 échantillons groupés à 1hz chaque 24h par ex.) : il permet d'analyser les bruits de mesures.

Les intervalles de confiance sur les moyennes bi horaires ainsi obtenues dépendront évidemment de la *variance réelle* des courants mesurés sur l'intervalle.

Chapitre 1 : Compte rendu d'essai au bassin

(A. Lourenço)

But : Intercomparaison de courantomètre mécanique (à rotor) et acoustique (doppler).

Date : 10 et 11 mars 2005

Lieu : Bassin d'essais des carènes de la DGA, Val de Reuil (27)

Participants : Thierry Monglon, Jérôme Guigand, Antonio Lourenço (LOCEAN),
Philippe Marie, Bruno Hamelin, Didier Fréchou (DGA)



Dispositif expérimental

Le B600 est un bassin de 545m de long, 15m de large et 7m de profondeur (cf figure 1).

Il est équipé

- d'un chariot de traction de 125tonnes capable de se déplacer sur 500m de 0.05 à 12 m/s (cf figure2).
- d'un générateur de vague à double volet coté « nord » (figure 3)
- et d'un plan incliné servant d'amortisseur de houle coté « sud » (figure 4)



figure 1 : le B600



figure 2 : le chariot



figure 3 : le générateur de vague
face nord



figure 4 : l'amortisseur de houle
face sud

L'orientation du bassin est de 14° Est par rapport au nord géographique.
Deux tube de 60mm de diamètre (inox A316L) ont été rajoutés au chariot pour cette expérience par les responsables du B600. Ils ont été placés sur la face sud du chariot, les essais se feront donc dans le sens nord-sud de telle sorte que les courantomètres soient face au courant.

Matériel utilisé.

5 courantomètres : 2 Aanderaa RCM7 (courantomètre mécanique à rotor) et 3 Nortek Aquadopp 2000m (courantomètre acoustique à effet Doppler)
Cf tableau 1 pour les configurations des courantomètres.

référence	Aq1	Aa1	Aq2	Aa2	Aq3
Instrument	Nortek Aquadopp	Aanderaa RCM7	Nortek Aquadopp	Aanderaa RCM7	Nortek Aquadopp
NS	1411 (1409)	2893	1496	3414	1403
tension début	14.47	7.34	14.49	7.35	13.48
position relative au bord Est [m]	3.5	5	7.5	10	12.5
mise à l'heure (TU+1)	11/03/05 08:58:56	10/03/05 10:55:40	11/03/05 09:38:55	10/03/05 11:05:20	11/03/05 11:20:10
mise en route	11/03/05 09:00:00	11/03/05 08:19:45	11/03/05 09:00:01	11/03/05 08:24:45	11/03/05 00:00:00
Montage sur	tube	tube	câble central	tube	tube
configuration	ENU HP alim ext et log interne		XYZ HP autonome (alim et log interne)		XYZ HP alim ext et visualisation
échantillonnage	3s	30s	3s	30s	3s

Synchronisation

Heure de la centrale d'acquisition du B600 : 11:42:00

Heure des courantomètres (GPS local TU+1) : 11:35:25

Soit : -6min35s à appliquer aux données provenant de la centrale d'acquisition du chariot.

Le montage.

Les courantomètres sont répartis comme indiqué sur la figure 5.

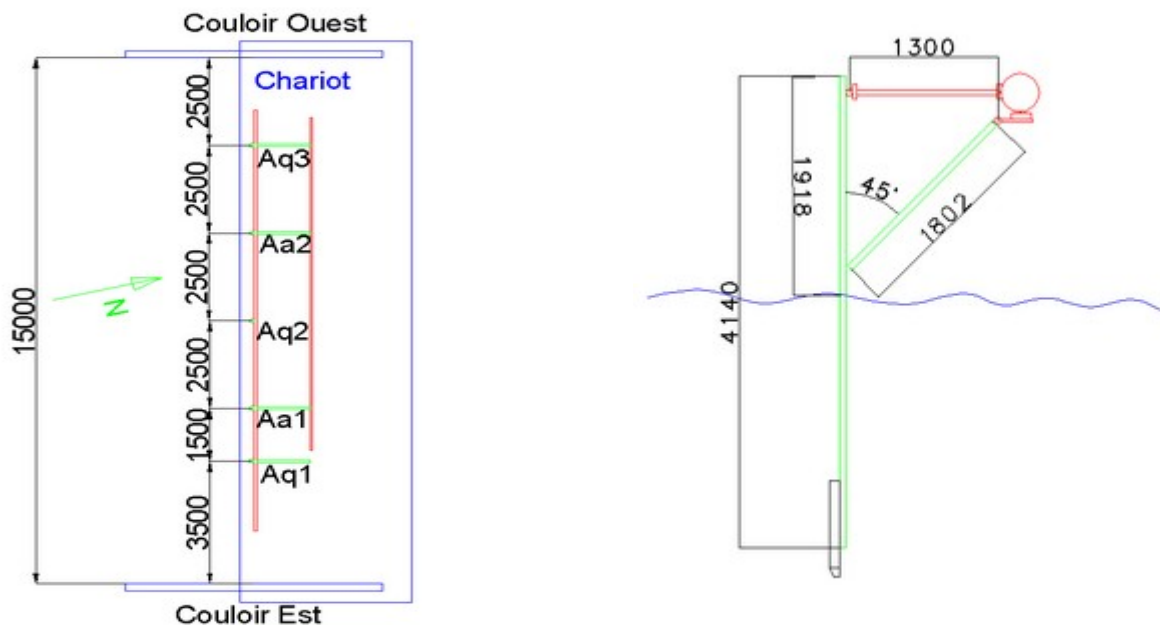


Figure 5 : montage des courantomètres (vue de dessus à gauche et vue de l'Est du bassin à droite). En rouge la structure présente sur le chariot, en vert le montage effectué

Nous avons choisi de monter les courantomètres sur des tubes Inox A304L (inox amagnétique) de 60mm de diamètre épaisseur 2mm, à l'exception de Aq2 qui est monté sur son système d'attache muni de sa dérive (cf. figure 6). Ce système étant relié par un câble en acier inoxydable en haut des tubes supportant Aq1 et Aq3, via le bas des tubes de Aa1 et Aa2, je ne sais pas si je suis très clair....(cf figure 7 pour le montage d'ensemble)



Figure 6 : A gauche Aq1 ou Aq3, au centre Aq2 à droite Aa1 ou Aa2.



Figure 7 : montage d'ensemble sur la face sud du chariot.

Déroulement du montage

Arrivé le jeudi 10 mars à 15h. Réalisation d'un prémontage en 2h30 à partir du plan incliné sud.

Vendredi 11 mars 8h30 mise en routes des courantomètres Aa1, Aa2, Aq1 et Aq2.

9h30 déplacement du chariot en « eau libre », en fait il recule pour sortir du plan incliné.

Mise en position des courantomètres à l'aide de deux barques. Manip loin d'être évidente car très instable. Il s'avère que les raccords tubulaires du bassin ne sont pas très pratiques (vieux, difficiles à visser, et 4 voir 8 vis par raccord), il est donc difficile de faire glisser les tubes. Il aurait sûrement été plus simple de les fixer directement sans faire le prémontage de la veille. Nous avons rallongé le tube de 9m mais la stabilité n'était pas suffisant et avons été contraint de rapprocher Aq1 de Aa1 et de ne les espacer que de 1.5m au lieu des 2.5m prévus.

Déroulement des Runs

Action	Vitesse chariot	heure de début	heure de fin	durée	distance	durée cumulée	distance cumulée
	[m/s]			[mn]	[m]	[mn]	[m]
retour chariot	0.50	13:42:50	13:58:45	15:55	478	00:15:55	478
repos bassin	0.00	13:58:45	14:22:34	23:49	0	00:39:44	478
RUN 1							
palier 1	0.05	14:22:34	14:29:34	07:00	21	00:46:44	499
palier 2	0.10	14:29:34	14:39:37	10:03	60	00:56:47	559
palier 3	0.25	14:39:37	14:48:38	09:01	135	01:05:48	694
palier 4	0.50	14:48:38	14:57:45	09:07	273	01:14:55	968
On déplace Aq1 vers Aa1 afin de réduire les vibrations de roulis							
retour chariot 1	0.50	15:39:35	15:44:40	05:05	152	01:20:00	1120
On haubane Aq1 et Aq3 toujours dans le but de réduire les vibrations de roulis... ça fonctionne mieux							
retour chariot 2	0.50	16:10:30	16:19:40	09:10	275	01:29:10	1395
repos bassin	0.00	16:19:40	16:32:53	13:13	0	01:42:23	1395
RUN 2							
palier 1	0.05	16:32:53	16:41:53	09:00	27	01:51:23	1422
palier 2	0.75	16:42:13	16:52:22	10:09	457	02:01:32	1879
retour chariot 1	0.50	16:54:30	16:59:31	05:01	150	02:06:33	2029
Arrêt d'urgence du chariot du a des microcoupure sur le système de sécurité !!!							
retour chariot 2	0.50	17:01:40	17:13:00	11:20	340	02:17:53	2369
repos bassin	0.00	17:13:00	17:37:20	24:20	0	02:42:13	2369
RUN 3							
palier 1	1.00	17:37:20	17:45:22	08:02	482	02:50:15	2851

L'accélération du chariot est la plus faible possible (0.05m/s²) afin d'éviter les oscillations sur la structure entre chaque palier.

Les fichiers de données sont sur \usr\hydro\ROUEN\data

Aq1 = Aq1.dat

Aa1 = AA2893

Aq2 = Aq2.dat

Aa2 = AA3414

Aq3 = Aq3_0.dat et Aq3_1.dat

Remarques :

- Aq2 monté avec sa dérive sur le câble, ne s'oriente pas dans le courant tant que $v < 0.1 \text{ m/s}$.
- Le pré-montage n'était pas un gain de temps.
- Le moulinet Honz, fournit par le Bassin, qui devait nous donner les vitesse de déplacement du chariot par rapport à l'eau (et non par rapport au sol comme indiqué dans la vitesse du chariot) n'a pas fonctionné.
- Les compas semblent perturbés par les structure métalliques du bassin.

Chapitre 2 : calibration des aquadopps

I- Configuration des aquadopps

Configuration géométrique des 3 courantomètres :

AQ1 : montage fixe , coordonnées terrestres ENU

AQ2 : montage sur pivot (girouette), coordonnées instrument XYZ

AQ3 : montage fixe, coordonnées instrument XYZ.

Les 3 AQ sont montés tête en bas ,et répartis de telle sorte qu'aucune des cellules de mesure ne se chevauche ni rencontre un obstacle (fond et bords du bassin, surface libre).

Configuration d'échantillonnage commune aux 3 appareils :

Mesures doppler : mesure chaque 3s, moyenne sur 1s, Pload = 100%, puissance d'émission = max .

Compas et tilt : 1hz

Les émissions sont décalées d'1s entre chaque AQ afin d'éviter des interférences inter-pings.

II- Traitement des données

II-1 Extraction des paliers de vitesse

Chaque aquadopp fournit un fichier brut (*.aqd) contenant l'ensemble des runs.

La centrale d'acquisition du chariot fournit un fichier (*.tep) par run. Les données chariot sont traitées dans l'annexe 2.

Dans le fichier brut à partir des temps de référence, on extrait chaque palier à vitesse constante . Puis visuellement par affichage graphique des différents paramètres, on élimine les points aberrants.(exemple en figures 1, 2 et 3 pour AQ1 à 25cm/s) Il en résulte que les fichiers de palier filtrés ont des tailles variables : N varie de 100 à 200 échantillons pour les paliers de runs,et entre 200 et 400 pour certains retours chariot et les mesures au point fixe.

II-2 Analyse des composantes de vitesse

II-2-1 Méthode

Pour chaque population de palier, on calcule une moyenne et un écart-type pour chacune des 3 composantes des vitesses XYZ ou ENU .

On vérifie graphiquement que , dans tous les cas , l'histogramme des distributions est proche de la loi normale (exemple en figure 3).

On peut alors calculer un intervalle de confiance sur les moyennes de palier, avec spécification bilatérale et niveau de signification :

$$\alpha = 0.01 \quad (\text{confiance} = 99\%)$$

Les résultats pour les 3 aquadopps apparaissent dans le tableau n°4.

II-2-2 Discussion qualitative sur les valeurs U_x et U_y

Elles sont toujours cohérentes avec la configuration des Aquadopps :

- pour AQ2 et AQ3 , dont les axes Ox sont théoriquement confondus avec l'axe de déplacement , on a bien

$$U_x \approx \pm U_{\text{chariot}} \quad U_y \approx 0$$

- pour AQ1 (en ENU) dont l'axe N est proche de l'axe du bassin (14° Est), la composante principale est bien sur U_y .
- les signes des composantes principales respectent bien le sens des déplacements en runs et en retours chariots pour AQ1 et AQ3 fixes. U_x est toujours négative pour AQ2

sur pivot ,sauf une valeur à 5cm/s, où la vitesse était trop faible pour forcer le retournement de la girouette.

- Cette discussion est reprise quantitativement dans l'analyse des angles du vecteur moyen.

Tableau n°4 : Moyennes de palier des composantes Ux,Uy,Uz											
aquadopp/ RUN	Moyenne chariot	N echant.	Ux moyen	stdv Ux	Ux Intcon f	Uy moyen	stdv Uy	Uy intcon f	Uz moyen	stdv Uz	Uz intconf
	cm/s		cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s
aq2 au repos	0,00	367	0,06	3,6	0,48	-0,05	3,5	0,47	-0,75	6,1	0,82
aq2 RUN1	5,08	100	-4,05	3,5	0,90	2,93	4,3	1,11	-0,26	6,8	1,75
aq2 RUN2	5,08	183	4,97	3,9	0,74	-0,43	4,0	0,76	0,96	7,1	1,35
aq2 RUN1	10,15	187	-10,09	3,5	0,66	0,90	3,4	0,64	-0,33	6,1	1,15
aq2 RUN1	24,97	167	-24,98	2,9	0,58	-1,04	2,7	0,54	-0,66	5,0	1,00
aq2 RUN1	49,72	167	-49,56	2,9	0,58	-1,80	2,8	0,56	-1,95	4,8	0,96
aq2 RUN2	74,59	192	-74,81	2,9	0,54	-3,11	2,8	0,52	-4,43	4,7	0,88
aq2 RUN3	99,45	150	-98,31	3,0	0,63	-4,24	3,0	0,63	-10,14	4,5	0,95
aq2 ret.char.	49,73	293	-49,30	2,8	0,42	-2,47	3,1	0,47	-0,35	5,1	0,77
aq2 ret.char.	49,73	173	-49,25	2,7	0,53	-2,80	3,2	0,63	0,37	5,1	1,00
aq2 ret.char.	49,73	183	-49,11	2,8	0,53	-3,29	3,0	0,57	0,17	5,0	0,95
aq3 au repos	0,00	363	0,59	3,5	0,47	0,36	3,5	0,47	-0,37	6,0	0,81
aq3 RUN1	5,08	117	-3,80	3,9	0,93	0,01	4,5	1,08	-0,60	6,5	1,55
aq3 RUN2	5,08	160	-3,68	4,0	0,81	-0,66	3,8	0,77	-0,39	6,7	1,36
aq3 RUN1	10,15	183	-9,57	3,8	0,72	-0,20	3,3	0,63	0,38	6,5	1,24
aq3 RUN1	24,97	170	-24,10	3,8	0,75	-1,03	3,3	0,65	-0,49	5,0	0,99
aq3 RUN1	49,72	170	-48,92	3,0	0,59	-2,20	3,4	0,67	0,78	4,5	0,89
aq3 RUN2	74,59	197	-73,90	3,1	0,57	-2,94	3,0	0,55	1,32	5,3	0,98
aq3 RUN3	99,45	153	-98,63	3,1	0,65	-3,96	2,7	0,56	1,54	5,1	1,06
aq3 ret.char.	49,73	192	50,52	2,9	0,54	2,18	2,9	0,54	-0,34	5,3	0,99
aq3 ret.char.	49,73	173	50,67	2,8	0,55	2,51	2,9	0,57	-0,75	4,7	0,92
aq3 ret.char.	49,73	83	50,66	2,8	0,79	2,57	2,9	0,82	-0,74	4,6	1,30
aq1 au repos	0,00	450	0,26	3,6	0,44	-0,80	3,6	0,44	0,21	6,2	0,75
aq1 RUN1	5,08	107	0,09	4,4	1,11	4,30	4,0	1,00	-0,20	6,8	1,69
aq1 RUN2	5,08	167	0,89	3,5	0,70	4,24	3,5	0,69	-0,56	6,5	1,30
aq1 RUN1	10,15	167	3,57	3,8	0,76	8,81	3,7	0,74	-0,25	6,0	1,20
aq1 RUN1	24,97	157	4,59	4,9	1,00	24,01	3,6	0,74	-0,66	5,3	1,09
aq1 RUN1	49,72	173	4,68	12,5	2,45	46,94	3,7	0,72	0,96	5,2	1,02
aq1 RUN2	74,59	192	10,58	17,6	3,28	70,91	5,1	0,95	1,26	5,1	0,95
aq1 RUN3	99,45	147	16,70	19,0	4,05	95,31	4,6	0,98	1,10	4,6	0,98
aq1 ret.char.	49,73	210	-10,70	7,9	1,40	-48,68	3,7	0,66	-0,51	5,0	0,89
aq1 ret.char.	49,73	177	-10,83	7,2	1,40	-48,81	3,5	0,67	-0,66	5,1	0,99

Figure n°1 : AQ1 à 25cm/s, Composantes ENU du vecteur vitesse

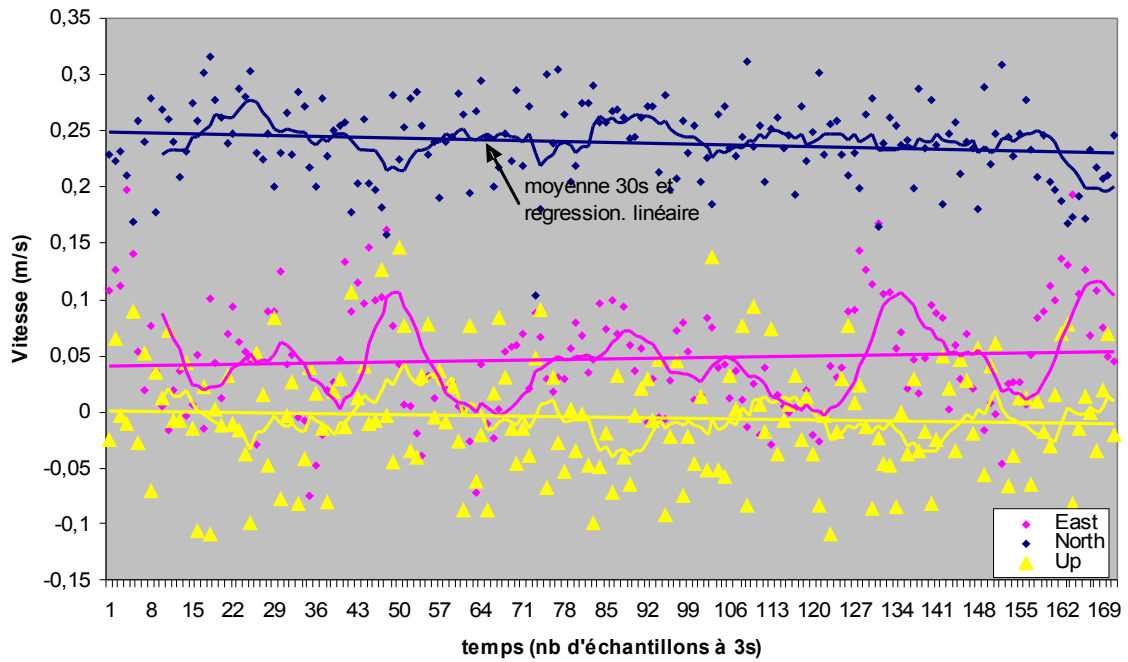
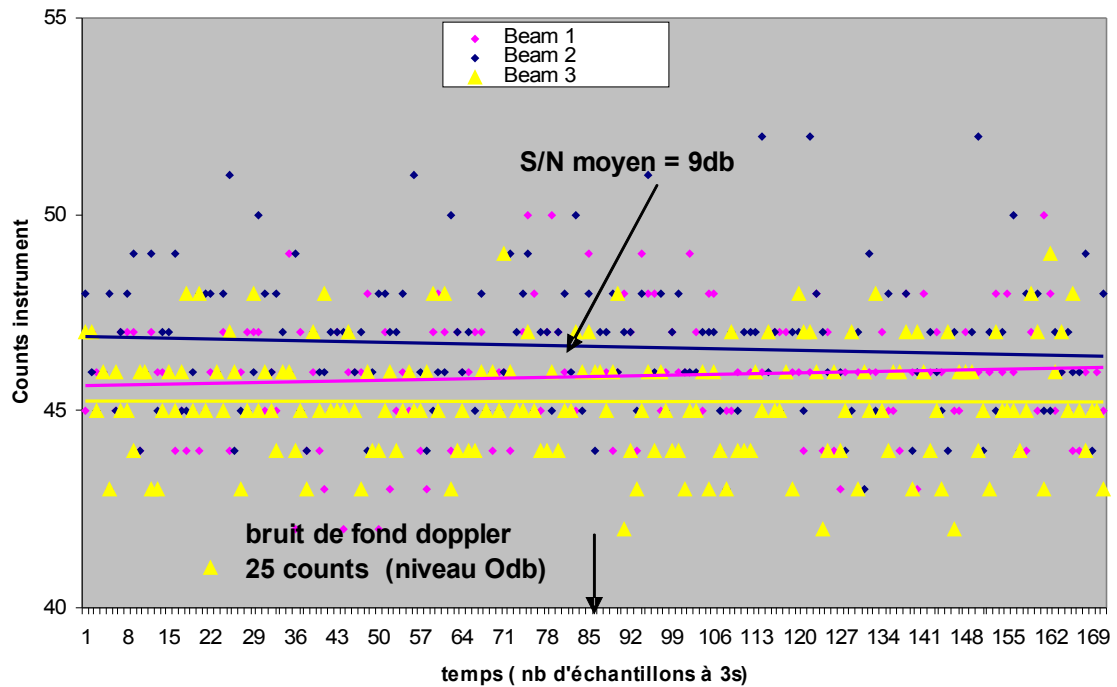
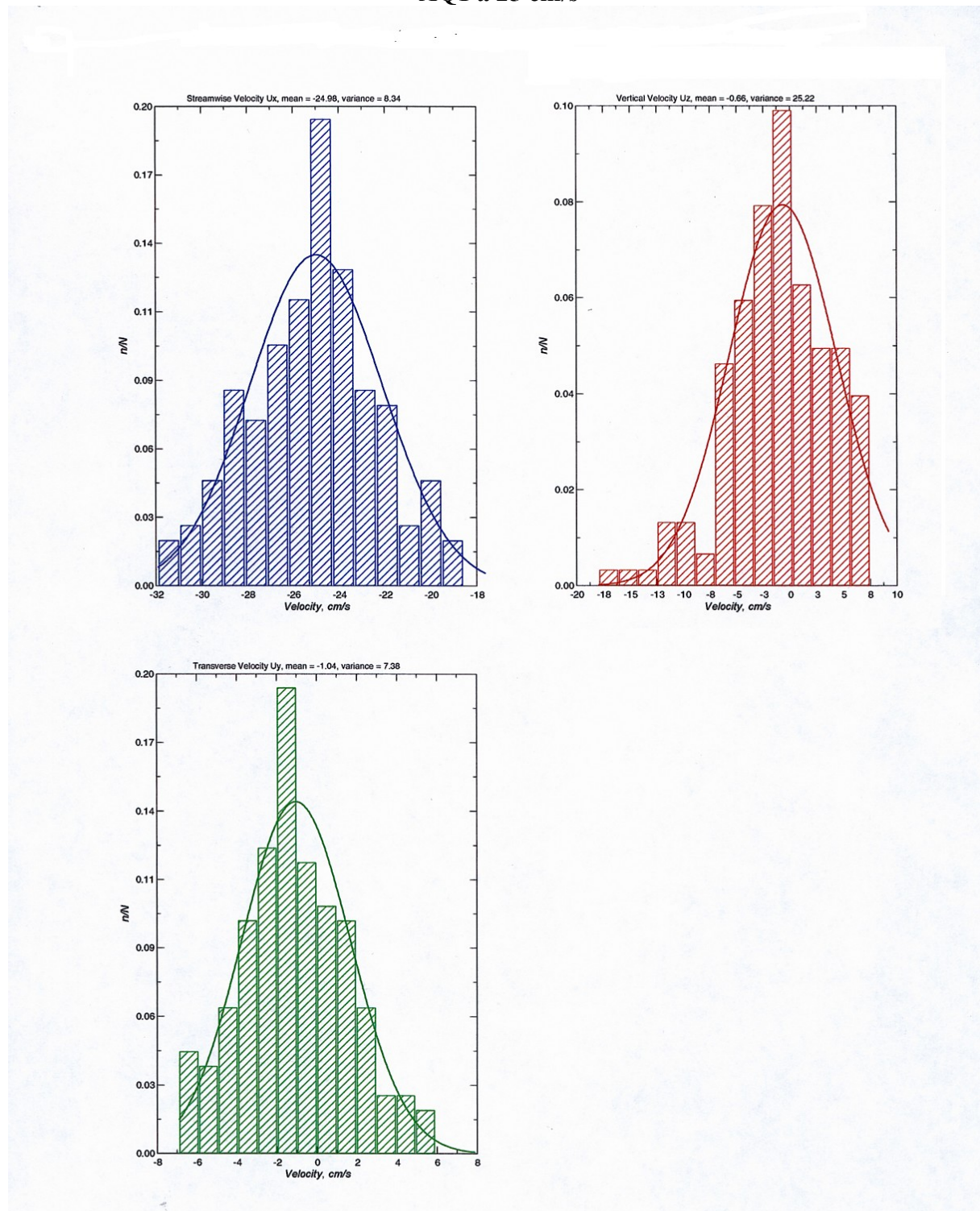


figure n°2 : AQ1 à 25 cm/s, echo intensité des 3 faisceaux
rapport signal/bruit doppler



**Figure n°3 : Histogrammes de distribution des composantes horizontales
AQ1 à 25 cm/s**



II-2-3 Discussion sur les valeurs de U_z

Les 3 aquadopps étant calés verticalement, U_z devrait toujours être nulle.

Si l'on teste cette hypothèse (test de comparaison à une moyenne nulle) sur le domaine de confiance des moyennes de palier U_z (calculé avec $\alpha = 0.01$), on trouve que 7 valeurs ne vérifient pas l'hypothèse (en rose sur le tableau n°4).

Elles correspondent toutes aux vitesses élevées (50, 75 et 100 cm/s) et s'expliquent par l'inclinaison progressive des axes verticaux des AQD sous l'effet de la trainée hydrodynamique. Le phénomène est particulièrement marqué pour AQ2, monté sur câbles souples et non sur poteau.

On peut retrouver ce comportement dans les fichiers « pitch ». On constate bien, par ex pour AQ2 à 100 cm/s : pitch moyen = 6° .

Remarque : pour AQ1, configuré en ENU, la correction matricielle de pitch/roll est déjà effectuée en interne par l'appareil : U_z calculé est un U_{up} selon la verticale, donc toutes les valeurs U_z de AQ1 devraient être validées par le test d'hypothèse nulle. Les 2 valeurs exclues le manquent de peu (0.12 et 0.31 cm/s).

II-2-4 Discussion sur les valeurs d'écart-type

a- Aquadopps en coordonnées XYZ

Pour chaque composante de vitesse, les écarts-type calculés sur les moyennes de palier sont faiblement corrélés au module (figure 5 pour U_x : $R^2=0.5$) et quasi constants (pente = -0.01).

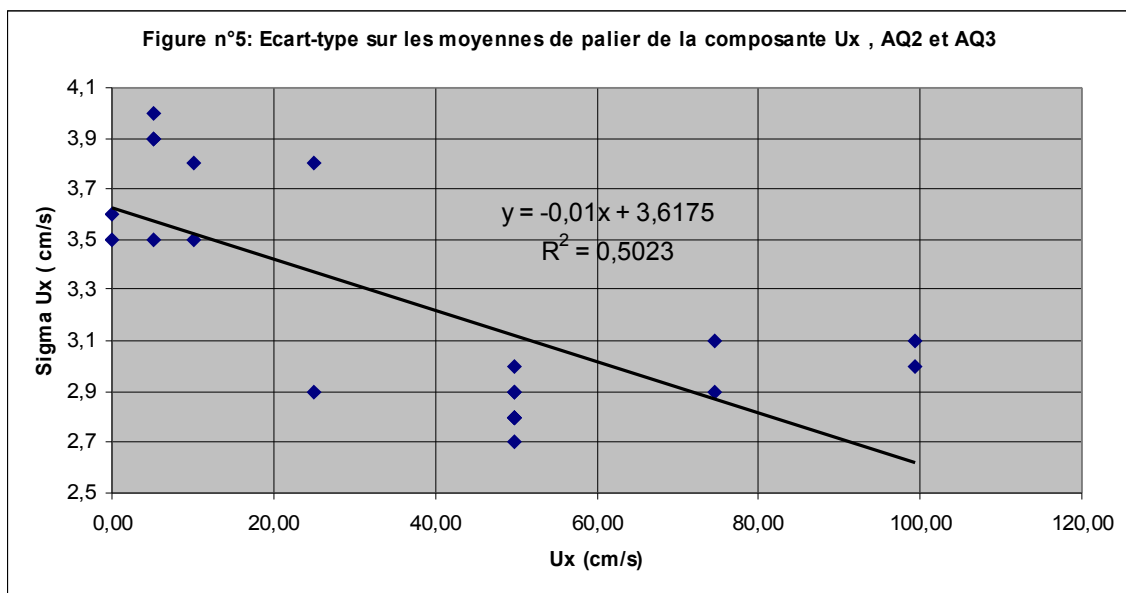


tableau 6 : Ecart-type sur les moyennes de palier des composantes de vitesses		
(cm/s)	AQ2 + AQ3	AQ1
stdv(U_x)	3.24	8.44
stdv(U_y)	3.27	3.89
stdv(U_z)	5.48	5.58

On peut donc raisonner sur les valeurs moyennes de ces écarts-type pour chaque composante : 3.25 cm/s sur les composantes horizontales et 5.5 cm/s sur la composante verticale, pour l'ensemble des mesures AQ2 + AQ3. (tableau 6).

L'écart-type vertical est en moyenne 1.6 fois supérieur à l'horizontal. Ceci est qualitativement cohérent avec le fait qu'une mesure doppler est d'autant plus fiable que le

vecteur vitesse est plus proche de l'axe des faisceaux d'émission (la composante verticale est théoriquement nulle dans notre configuration).

D'ailleurs dans tous les calculs de prédiction de précision par l'algorithme de Nortek, on retrouve bien ce rapport 1.5 entre précisions verticales et horizontales.

b- Aquadopp en coordonnées ENU (AQ1)

Dans le tableau 6 , on constate des écarts-type horizontaux nettement supérieurs à ceux de AQ2 et AQ3, en particulier sur Ux (East). Deux facteurs (indépendants) expliquent ce constat :

b-1) l'environnement magnétique du bassin

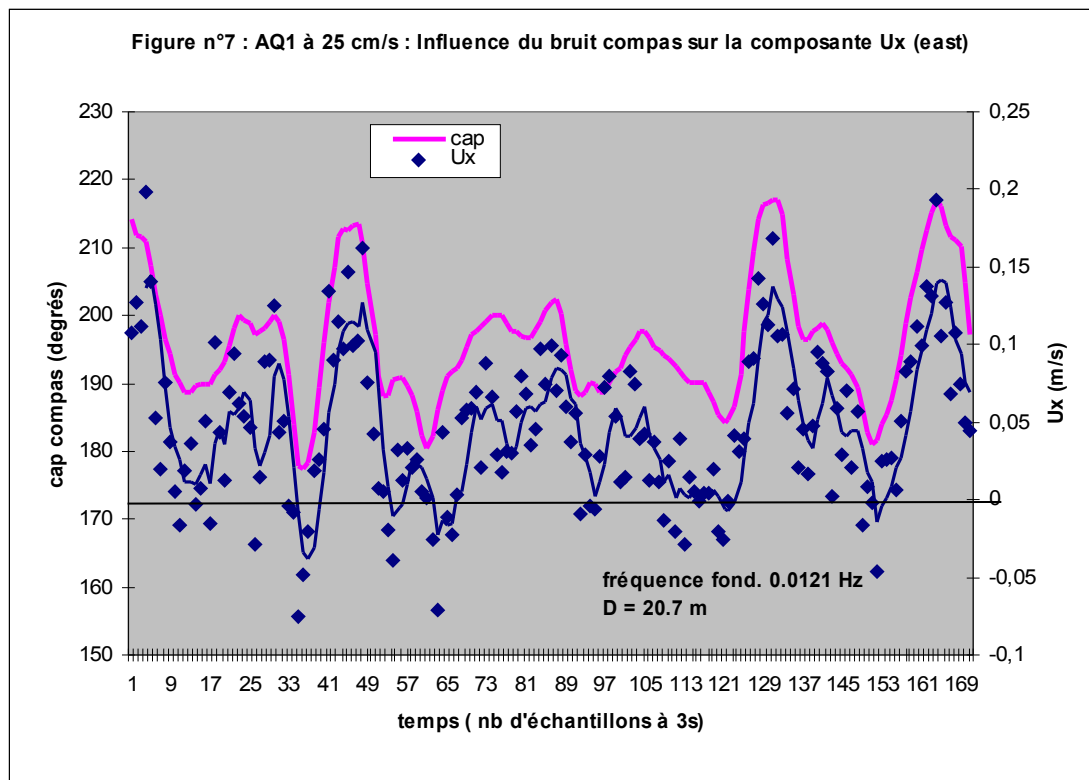
Il est très hétérogène, le signal « heading » (cap compas) varie donc lors du déplacement du chariot avec une amplitude pouvant atteindre $\pm 30^\circ$ alors que, pour AQ1 en montage fixe, il devrait rester constant .Ce bruit magnétique ne peut pas affecter les mesures de AQ2 et AQ3, pour lesquelles le signal compas est ignoré.

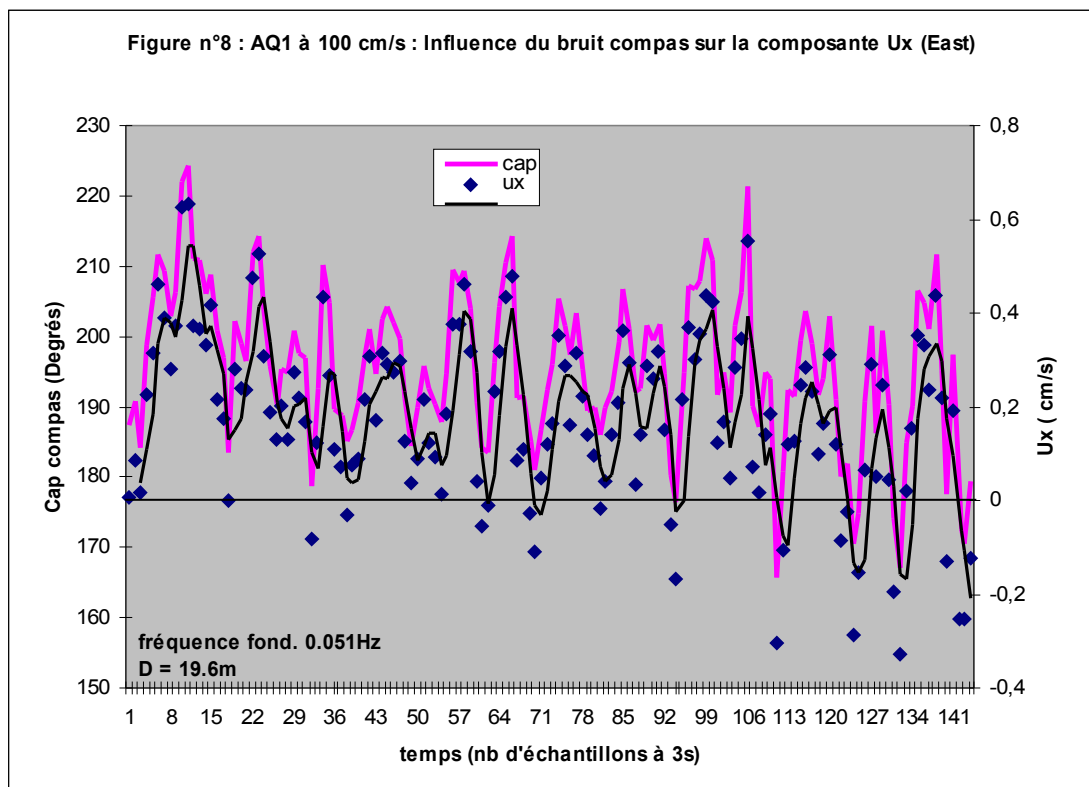
C'est donc le bruit du compas qui explique une partie de l'ecart-type horizontal accru de AQ1.

Une analyse spectrale succincte de ce bruit pour l'ensemble des runs prouve que *les fréquences fondamentales sont fortement corrélées linéairement aux vitesses chariot* (de 0.005hz à 5 cm/s à 0.05 Hz à 100 cm/s). On en déduit donc que ce bruit est généré par une structure magnétique du bassin qui présente un pas régulier d'environ 20m selon l'axe de déplacement du chariot.

Ce bruit harmonique se retrouve-t-il dans le spectre des composantes horizontales des vitesses ?

- il est indiscernable dans la composante principale Uy (North)
- il est très visible dans la composante Ux (East). Les figures 7 et 8 montre la forte corrélation entre cette composante et le cap compas à 25cm/s et 100cm/s.
- comme Ux est la composante faible, le bruit magnétique induit finalement une variance assez faible sur le vecteur moyen .





b-2) des vibrations de structure

On constate dans le tableau 4 que l'écart-type sur (U_x) est particulièrement fort aux vitesses élevées (runs à 75 et 100cm/s). Or pendant ces runs, nous avons constaté visuellement d'importantes vibrations mécaniques du poteau supportant AQ1, à cause d'un montage particulier de ses bras de poussée (AQ2 et AQ3 ne sont pas concernés). Ces vibrations apparaissent clairement sur les enregistrements « pitch/roll » correspondants.

Aux basses vitesses jusqu'à 25cm/s (figure 9), les amplitudes restent faibles (roulis $< 1^\circ$, tangage $< 3^\circ$) et le spectre fréquentiel est très pur, calé sur une fondamentale à 0.07 hz.

A 100cm/s (figure 10), le roulis devient prépondérant avec des amplitudes atteignant 12° et un biais de -2.5° . Le spectre révèle encore une fondamentale à 0.07 hz mais une grande partie de l'énergie passe dans une série d'harmoniques à plus basse fréquence : c'est la signature d'une forte turbulence de sillage, qui probablement vient exciter la fréquence propre du poteau à 0.07hz.

Ce rapport n'a pas pour objet d'étudier plus en détail ces instabilités hydrodynamiques et d'ailleurs les fréquences d'échantillonnages utilisées ne s'y prêteraient pas.

Nous retiendrons simplement les points suivants :

- le bruit de sillage n'affecte pas directement les mesures doppler *en marche avant du chariot*, car les cellules de mesure sont situées dans l'écoulement amont. (discutable lors des retours chariot...)
- ce sont les vibrations mécaniques induites dans le poteau support qui affectent ces mesures car elles créent un *mouvement périodique apparent* de l'aquadopp par rapport au chariot.
- On ne retrouve pas clairement la signature à 0.07 hz dans le spectre de vitesse U_x . La première raison est que le capteur d'assiette (tilt) de l'aquadopp analyse bien ces vibrations (puisque'il les échantillonne à 1 hz en interne), et la conversion angulaire

XYZ>ENU fait, en principe, les corrections nécessaires sur le vecteur moyen . La deuxième raison est que cette fréquence mécanique et surtout ses harmoniques BF sont dans le spectre du bruit magnétique du compas . *On ne peut donc pas conclure sur la contribution respective des 2 phénomènes à l'accroissement constaté sur l'écart-type de AQ1 aux grandes vitesses.*

Cette longue discussion n'est pas uniquement académique : les mouillages océaniques sont fréquemment le siège de vibrations mécaniques dans les câbles. Il est donc important de constater ici que le capteur de tilt des aquadopps est (probablement) capable de faire les corrections nécessaires , au moins dans le domaine de fréquences rencontré au bassin.

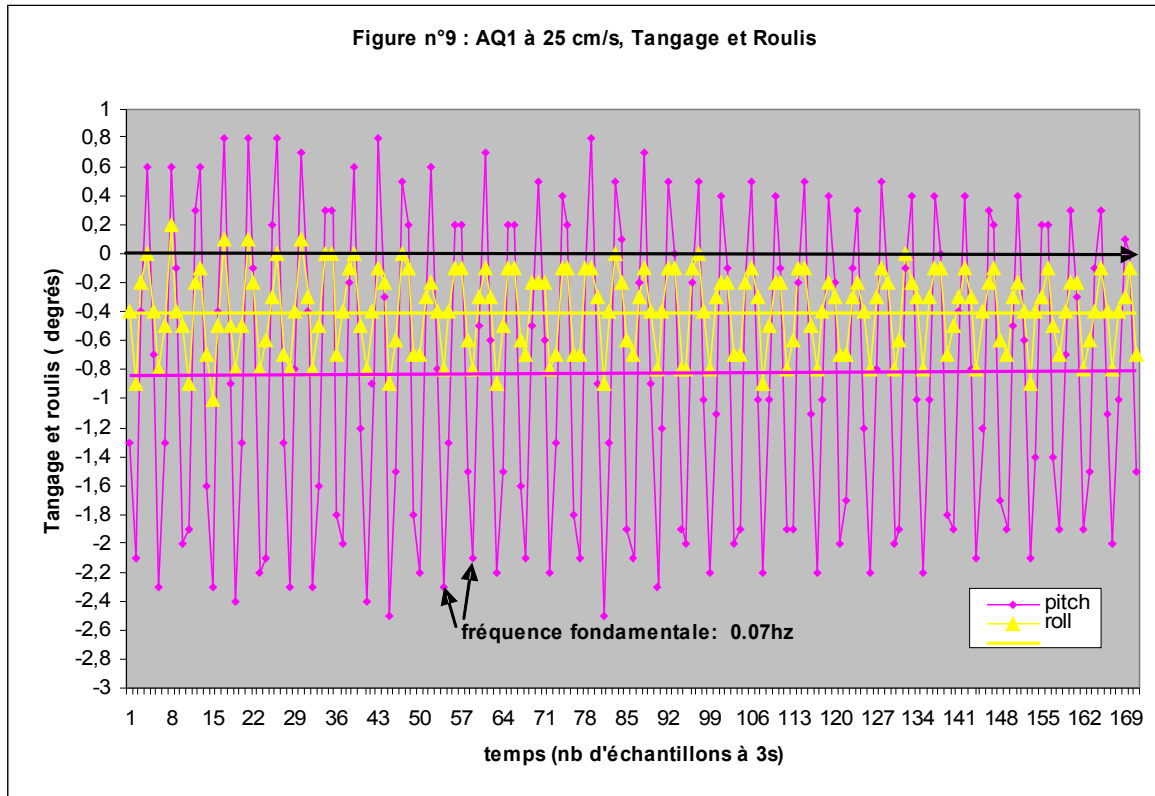
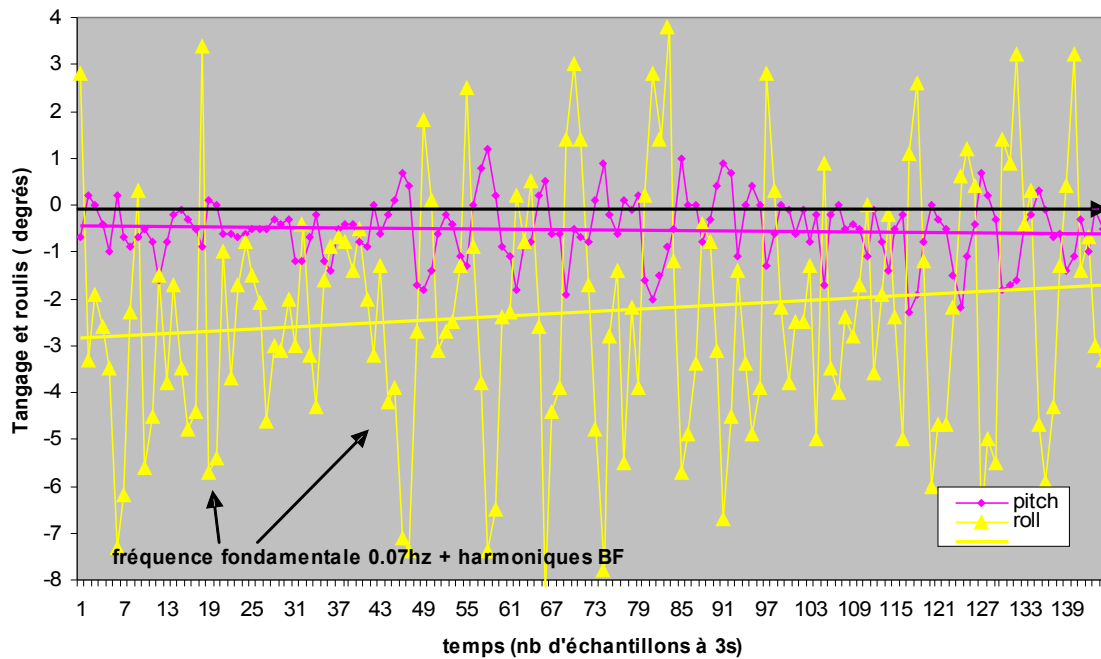


Figure n° 10 : AQ1 à 100 cm/s, Tangage et Roulis



II-2-5 Discussion sur les domaines d'incertitudes

a- aquadopps en coordonnées XYZ

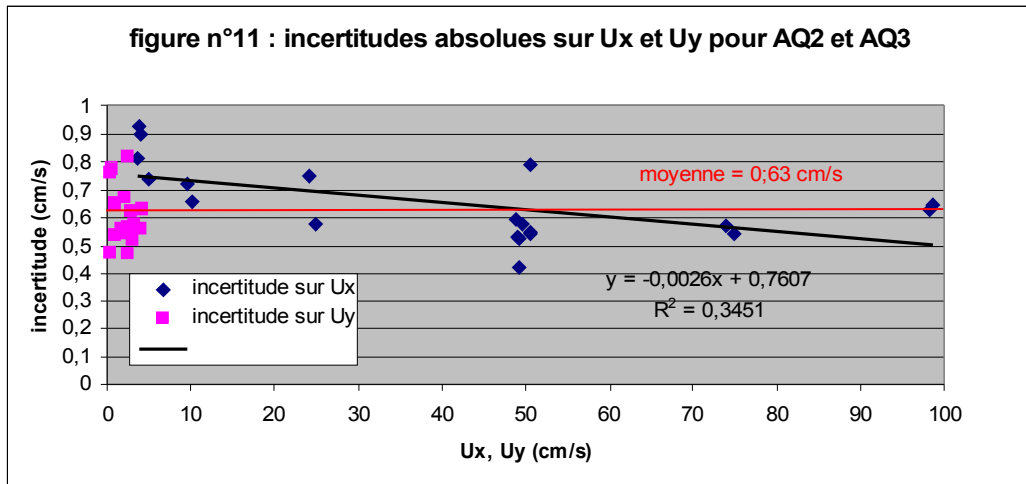
On reprend la discussion précédente en analysant maintenant les intervalles de confiance sur les moyennes de palier, c'est-à-dire les domaines d'incertitude absolue sur ces moyennes calculés ainsi pour la moyenne U_x :

$$\Delta U_x = K_{\alpha/2} * \frac{\sigma(U_x)}{\sqrt{N}}$$

avec :

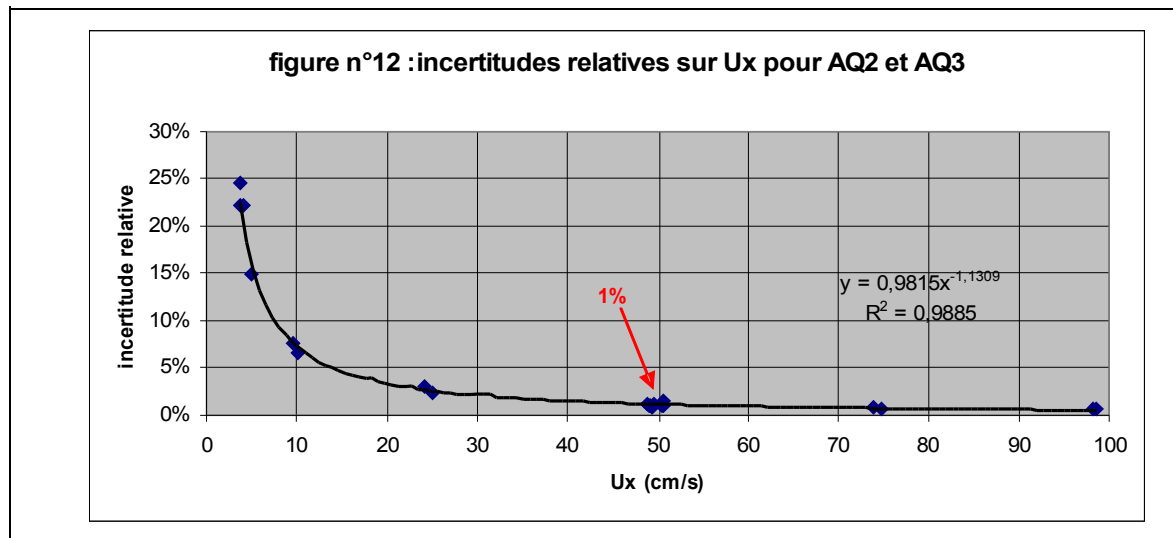
- α , niveau de signification (=0.01, dans notre cas)
- $K_{\alpha/2}$, probabilité selon la loi normale.
- N , nombre d'échantillons du palier

On ne discute que des composantes horizontales, la composante verticale ayant déjà été traitée au §II-2-3.



La figure 11 prouve que ces incertitudes sont faiblement corrélées aux modules des vitesses ($R^2 = 0.35$), donc nous raisonnerons sur une valeur moyenne pour l'incertitude absolue :

$$\Delta = \pm 0.65 \text{ cm/s}$$



On calcule l'incertitude relative pour chaque moyenne de palier $\frac{\Delta U_x}{U_x}$ reportée sur la figure 12. On obtient logiquement une décroissance quasi-hyperbolique, puisque ΔU_x est presque constant. La valeur de 1% est atteinte vers 50 cm/s.

Comparaison aux valeurs de précision du constructeur Nortek

Valeurs moyennes

Le constructeur annonce pour toute la plage de mesure (0 à 5 m/s), mais sans aucune indication sur la configuration de l'appareil, une précision de :

$$\Delta = \pm 0.5 \text{ cm/s} \text{ ou } 1\% \text{ de la valeur mesurée}$$

Nos valeurs sont globalement assez proches, mais moins bonnes pour les basses vitesses.

Prédiction pour une configuration particulière

Notre valeur moyenne de précision horizontale $\Delta = \pm 0.65 \text{ cm/s}$ correspond à des populations moyennes de 150 échantillons mesurés chacun sur un intervalle de 1s. On va donc la comparer à une prédiction par l'algorithme Nortek pour une mesure effectuée sur un « averaging interval » de 150s avec un facteur d'émission Pload = 100%, Qui prévoit alors *pour l'erreur instrumentale pure (short term error)* :

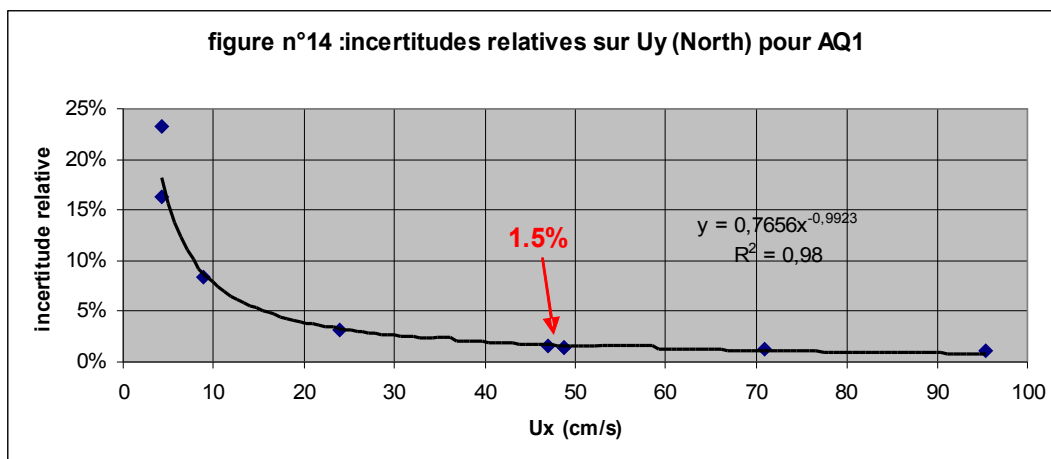
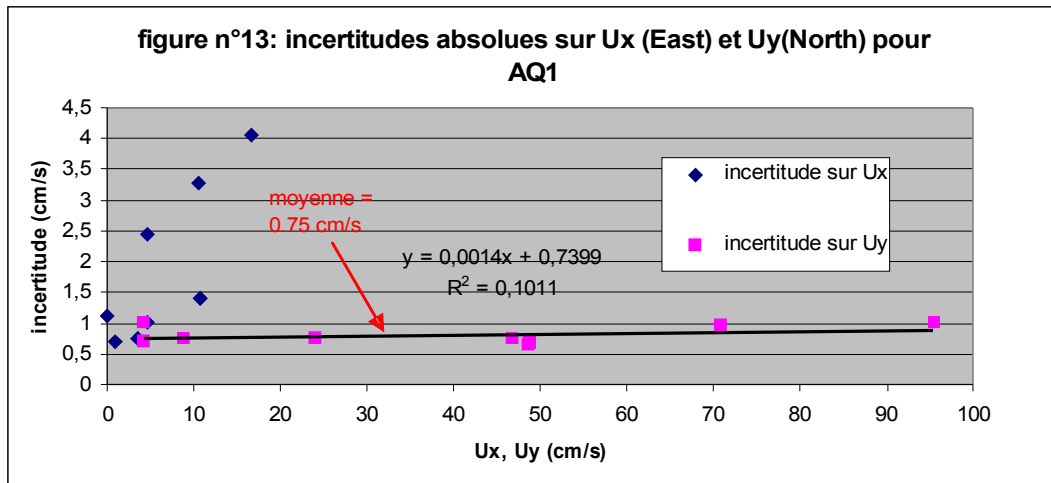
$$\Delta_{\text{horizontal}} \approx \pm 0.2 \text{ cm/s}$$

S

En effet on constate que sur l'ensemble des runs, l'écho intensité des signaux est comprise entre 40 et 60 « counts » (cf figure 2), ce qui correspond à *un rapport signal/bruit très faible de 10 db*, pour un bruit de fond Doppler évalué à 25 counts sur la doc Nortek.

Cette dégradation de la précision est particulièrement marquée aux basses vitesses ($U < 10 \text{ cm/s}$) où l'incertitude moyenne augmente à $\Delta_{\text{horizontal}} \approx \pm 0.8 \text{ cm/s}$, donc 4 fois la prédiction doppler.

b- Aquadopp en coordonnées ENU (AQ1)



L'incertitude absolue sur la composante principale Uy (North) est constante et égale à 0.75cm/s. L'incertitude sur la composante transversale Ux est forte et stochastique à cause du bruit expérimental induit par les vibrations de structure et le bruit magnétique déjà évoqués.

L'incertitude relative sur la composante U_y atteint 1.5% à 50cm/s.

On conclut donc qu'un environnement magnétique défavorable (notre cas) fait baisser sensiblement la précision des mesures converties en coordonnées terrestres par rapport aux mesures exprimées en coordonnées instrument.

III- Calibration des vitesses Aquadopp sur les vitesses chariot

III-1 Méthode

Les moyennes de palier calculées pour les composantes U_x , U_y et U_z donnent directement les coordonnées du vecteur moyen U dont on calcule le module :

$$|U| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

et l'angle polaire dans le plan horizontal XY :

$$\theta = \arctg\left(\frac{U_y}{U_x}\right)$$

Les intervalles de confiance (bilatéraux symétriques) calculés sur les 3 composantes permettent de définir un rectangle de confiance dans le plan XY dont on déduit les domaines de confiance bilatéraux asymétriques pour le module du vecteur moyen :

$$[|U| - \Delta U_{\text{inf}}, |U| + \Delta U_{\text{sup}}] \quad (1)$$

et pour son angle :

$$[\theta - \Delta \theta_{\text{inf}}, \theta + \Delta \theta_{\text{sup}}] \quad (2)$$

Pour chaque palier de vitesse et pour chaque aquadopp :

- on compare alors le module du vecteur moyen à la vitesse-chariot, en appliquant une fonction erreur $(|U| - V_{\text{chariot}})$ aux bornes (1), et en représentant la bande d'erreur graphiquement pour toute la série de runs.
- on analyse l'évolution de l'angle en représentant graphiquement la bande de confiance (2) pour toute la série des runs.

Finalement on établit pour chaque aquadopp une courbe de calibration sous forme d'une corrélation linéaire : $U_{\text{chariot}} = a.U_{\text{aqquadopp}} + b$. On y applique une analyse de variance avec calcul d'erreur-type sur les prédictions.

III-2 Tests d'erreurs sur les modules

Ils apparaissent sur les 3 graphes de la figure 15. On rappelle que, dans ce test, la valeur de la vitesse chariot est supposée être estimée sans erreur.

Commentaires

- pour les 3 aquadops, les mesures à l'arrêt sont invalidées : le bruit de mesure intrinsèque induit un biais systématique de + 1cm/s.
- pour AQ2, TOUS les points sont validés par le test et la bande de confiance se positionne assez symétriquement autour de l'axe Zéro.
- pour AQ1, les 3 runs à grande vitesse, où les vibrations de structure ont été constatées, sont invalidés (de -1.5cm/s moyen).
- Pour AQ3, on peut considérer que tous les points de runs directs sont en limite de validation, mais que les 3 retours chariot sont invalidés de +0.5cm/s.

Conclusions sur les mesures de modules :

- un aquadopp est incapable de valider une vitesse nulle .
- un aquadopp monté sur pivot et configuré en coordonnées instrument donne, dans nos conditions, des mesures exactes dans tout le domaine de vitesse avec une précision $\Delta = \pm 0.65 \text{ cm/s}$
- les aquadopps montés sur structure fixe sont moins exactes car plus sensibles au sillage turbulent (du poteau lors des retours chariots) et aux vibrations de structure.
- Un aquadopp configuré en coordonnées terrestres voit sa précision diminuée par le bruit du compas , $\Delta = \pm 0.75 \text{ cm/s}$ avec un environnement magnétique hétérogène.

III-3 Analyse des angles

Elle apparaît dans les 3 graphes de la figure 16. Les mesures à l'arrêt ont été supprimées car la notion d'angle n'y est pas significative. Tous les angles ont été ramenés dans le quadrant (-90°, +90°) quelque soit le sens de déplacement du chariot, pour la facilité d'interprétation graphique.

Commentaires

- la largeur de la bande d'incertitude décroît fortement avec la vitesse : de 30° à 5cm/s , elle tombe, à partir de 50cm/s, à moins de 1.5° pour AQ2 et AQ3 en coordonnées XYZ, et moins de 6° pour AQ1 en coordonnées ENU.
- Avec les vitesses croissantes , les mesures des 3 aquadopps convergent asymptotiquement vers des valeurs physiquement significatives :
 - o pour AQ1, environ 78° , qui correspond à l'axe magnétique du bassin 73° + la déviation du compas et/ou un biais de calage de la ligne de foi de AQ1 par rapport à l'axe du bassin .
 - o pour AQ2 , 2.7° moyen qui correspond à un biais de calage de la ligne de foi de AQ2 par rapport au plan de la girouette .
 - o pour AQ3 , 2.4° moyen qui correspond à un biais de calage de la ligne de foi de AQ3 par rapport à l'axe du bassin.
- Pour AQ1 et AQ3 en montage fixe, la bande de confiance aux basses vitesses, bien que large, encadre néanmoins la valeur asymptotique finale.
- Pour AQ2 sur pivot , la bande à 5cm/s n'encadre pas la valeur 0° car , à cette vitesse au premier run, la girouette ne se positionnait pas naturellement dans la veine de courant mais conservait une incidence constante d'environ 30° qui a disparu aux runs ultérieurs.

Conclusions sur les mesures d'angles :

- Comme nous n'avons pas d'estimation précise des angles de référence absolus (déviation réelle du champ magnétique local, valeurs exactes des biais de positionnement des lignes de foi des aquadopps), nous n'avons pas pu évaluer par test d'hypothèse l'exactitude absolue des mesures d'angles.
- Neanmoins, à partir de 50cm/s les angles moyens mesurés convergent tous vers des valeurs physiquement cohérentes , à moins de 3° près.
- La largeur de bande d'incertitude tombe , à partir de 50cm/s , à des valeurs inférieures à $\pm 1^\circ$ pour les aquadopps en coordonnées instrument , et $\pm 3^\circ$ pour celui en coordonnées terrestres. Nortek donne $\pm 2^\circ$ pour la précision du compas fluxgate.

- La précision à 5cm/s ($\pm 17^\circ$) et 10cm/s($\pm 5^\circ$) est assez médiocre , mais elle serait certainement améliorée par des conditions d'echo-intensité plus favorables.

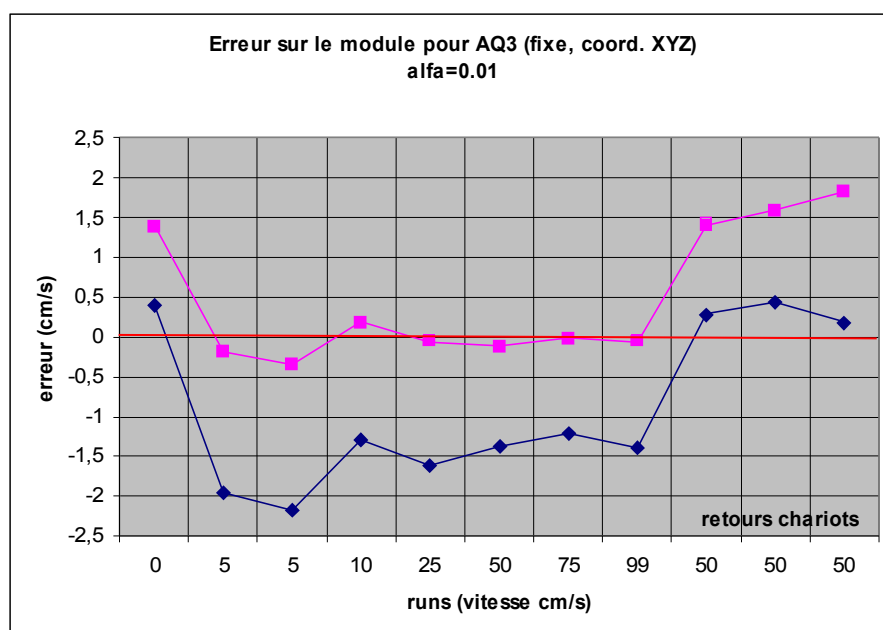
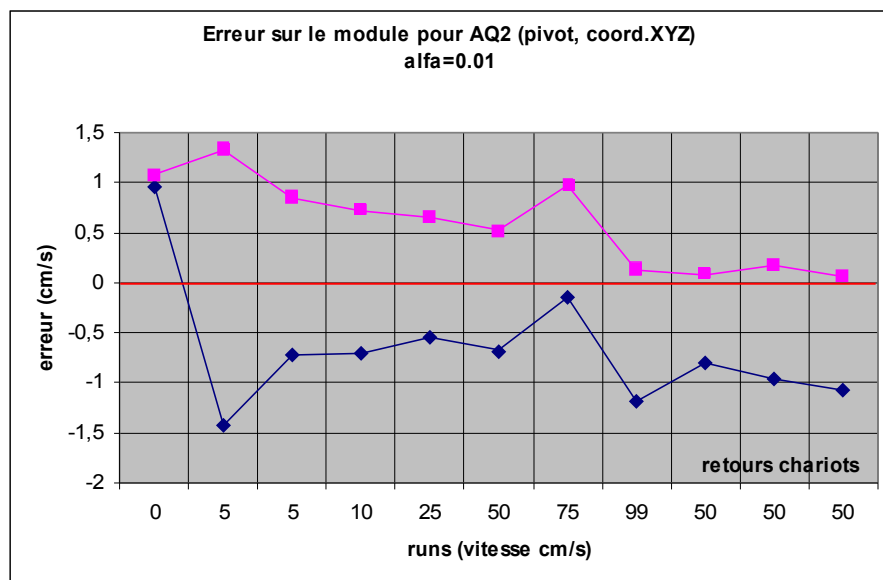
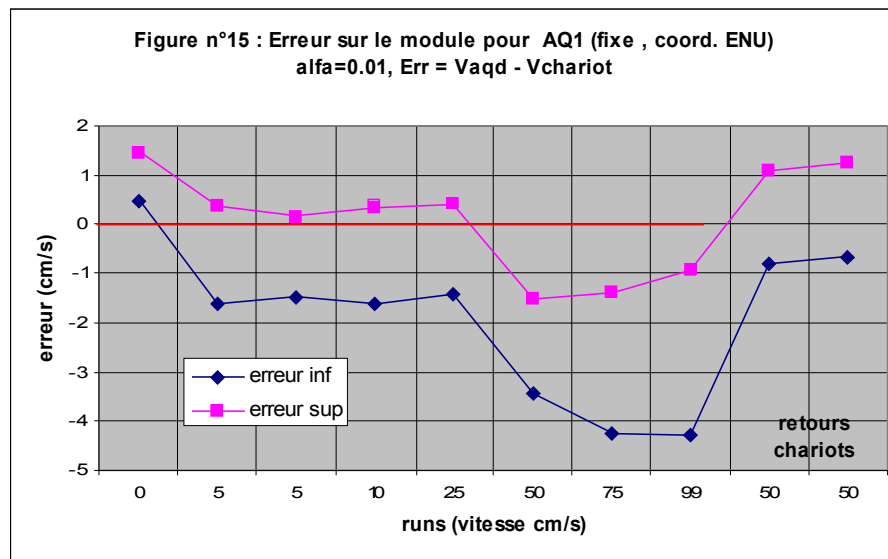
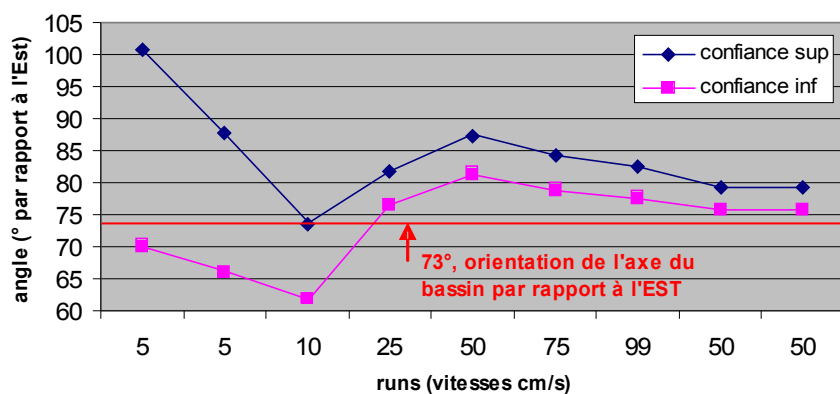
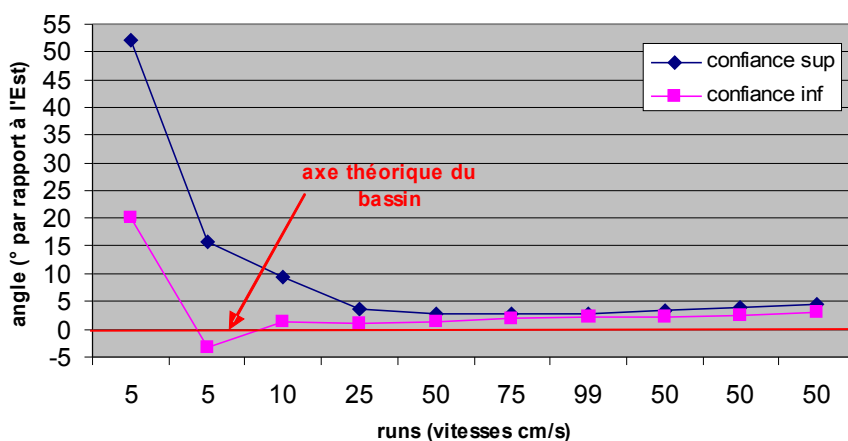


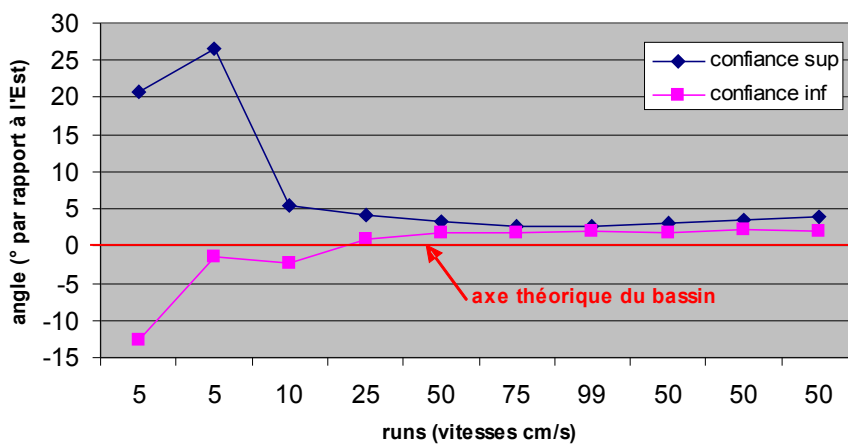
Figure n°16 :Angle EN pour AQ1(fixe)
angle de la résultante de la moyennation vectorielle sur chaque palier



Angle XY pour AQ2 (sur pivot)
angle de la résultante de la moyennation vectorielle sur chaque palier



Angle XY pour AQ3 (fixe)
angle de la résultante de la moyennation vectorielle sur chaque palier



III-4 Corrélations d'étalonnage sur les modules

Par régression linéaire moindres carrés, on établit pour chaque aquadopp une corrélation du type :

$$U_{\text{chariot}} = a.U_{\text{aqd}} + b$$

Vitesses exprimées en cm/s

Les 3 graphes apparaissent dans la figure 17, avec les rectangles d'incertitude (précision mesure aquadopp en x, erreur type de prédiction en y) et le tableau qui suit donne les valeurs des paramètres des régressions.

Aquadopp	a	b	R ²	erreur type sur U	F=S/N
AQ1	1,0261	0,0237	0,9991	1,06 cm/s	8908
AQ2	1,0066	-0,0458	0,9999	0,31 cm/s	104815
AQ3	0,9950	0,4273	0,9992	0,96 cm/s	11100

Les mesures à l'arrêt ont été invalidées par les tests d'hypothèse. On peut alors forcer la constante b à zéro dans les régressions et on obtient le tableau suivant :

Aquadopp	a	b	R ²	erreur type sur U	F=S/N
AQ1	1,0264	0,0000	0,9991	1,00 cm/s	10019
AQ2	1,0058	0,0000	0,9999	0,30 cm/s	115277
AQ3	1,0018	0,0000	0,9991	0,95 cm/s	11251

Commentaires

- le coefficient de détermination (R²) et le rapport signal/bruit (F) sont très élevés . Les corrélations expliquent donc largement la variance expérimentale au niveau de signification $\alpha = 0.01$
- les pentes sont très proches de 1
- l'erreur type sur les valeurs de U prédites par les corrélations varie de $\pm 0.3 \text{ cm/s}$ pour AQ2 à $\pm 1 \text{ cm/s}$ pour AQ1 et AQ3.

Conclusion

Les précisions des mesures expérimentales étant de :

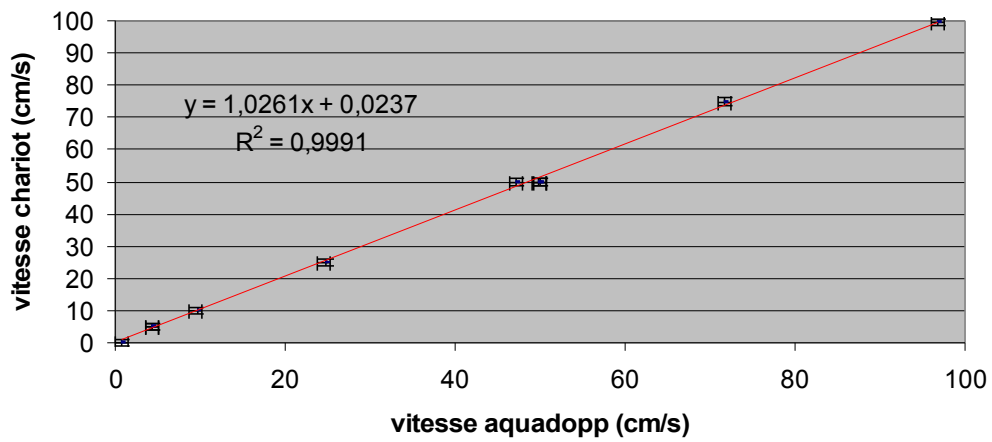
- $\pm 0.65 \text{ cm/s}$ pour AQ2 et AQ3 dans le domaine de vitesse [10,100cm/s]
- $\pm 0.80 \text{ cm/s}$ pour AQ2 et AQ3 dans le domaine de vitesse [5,10cm/s]
- $\pm 0.75 \text{ cm/s}$ pour AQ1 dans tout le domaine de vitesse [5,100cm/s]

On peut conclure que les droites de calibration établies estiment les vitesses horizontales avec une précision de $\pm 1 \text{ cm/s}$ pour les 3 aquadopps dans tout le domaine de vitesse [5,100cm/s]

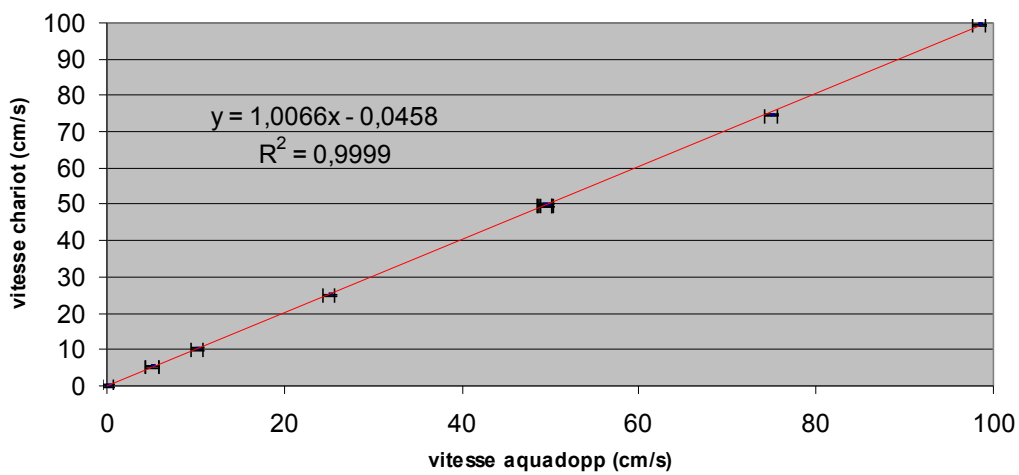
Pour AQ2 monté sur pivot , les précisions de calibration s'avèrent meilleures

- $\pm 0.65 \text{ cm/s}$ dans le domaine [10,100cm/s]
- $\pm 0.80 \text{ cm/s}$ dans le domaine [5,10cm/s]

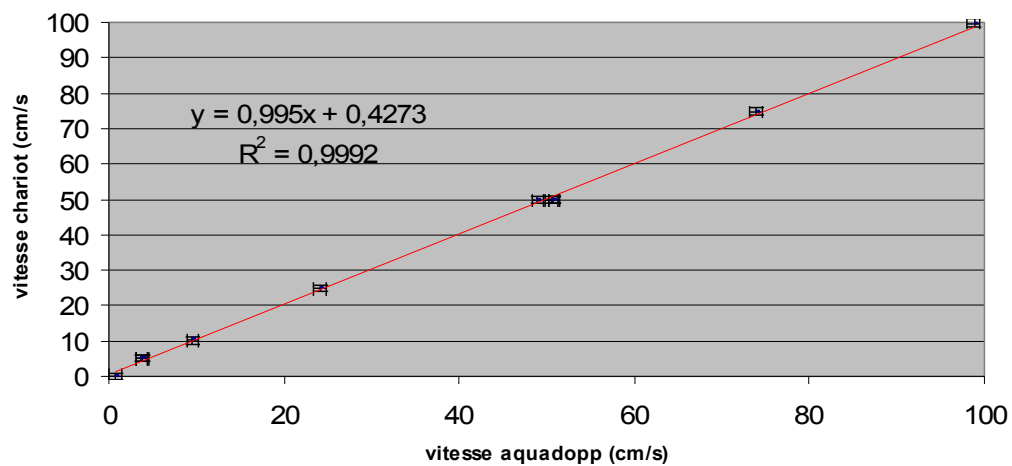
Figure n°17 : Calibration AQ1 (fixe , coord. ENU)



Calibration AQ2 (pivot, coord. XYZ)



Calibration AQ3 (fixe , coord. XYZ)



IV- Conclusion générale sur les calibrations des Aquadopps en bassin

IV-1 Conditions expérimentales :

- le domaine de vitesse [0, 100cm/s] a été exploré par paliers à vitesse constante (5, 10, 25, 50, 75, 100 cm/s), avec une précision de 0.004cm/s sur les moyennes de référence palier (vitesses chariot).
- Sur chaque palier, les aquadopps ont effectué en moyenne 150 échantillons de 1s, au pas de 3s, avec facteur d'émission et puissance maxima.
- La rétrodiffusion de l'eau du bassin était très pauvre : la valeur moyenne du rapport (signal/bruit de fond Doppler) était de 10 db.
- L'environnement magnétique du bassin était très hétérogène : on a constaté des écarts de 30° sur les signaux des compas échantillonnés à 1 hz, au cours des déplacements du chariot.
- Le calage des lignes de foi des aquadopps par rapport à l'axe du bassin a été réalisé « à vue » avec un biais de 2 à 3 °, évalué a posteriori.
- Dans certains runs à grande vitesse, des vibrations de structures ont partiellement bruité les mesures.

IV-2 Résultats :

a- Modules des vitesses moyennes de palier

Pour chaque aquadopp, on a pu établir une corrélation linéaire de calibration sur les vitesses chariots, prises comme vitesses de référence connues sans erreur :

Pour AQ1 (montage fixe , coordonnées terrestres ENU)

$$U_{chariot} = 1.0264.U_{aq1}$$

Pour AQ2 (montage sur pivot , coordonnées instrument XYZ)

$$U_{chariot} = 1.0058.U_{aq2}$$

Pour AQ3 (montage fixe , coordonnées instrument XYZ)

$$U_{chariot} = 1.0018.U_{aq3}$$

Ces 3 corrélations expliquent plus de 99% de la variance expérimentale :

$$R^2 \geq 0.999 \text{ et } F_{0.01} \geq 10000$$

Elles estiment les vitesses horizontales avec une précision de $\pm 1 \text{ cm/s}$ pour les 3 aquadopps dans tout le domaine de vitesse [5,100cm/s]

Pour AQ2 monté sur pivot, les précisions de calibration s'avèrent meilleures

- $\pm 0.65 \text{ cm/s}$ dans le domaine [10, 100cm/s]
- $\pm 0.80 \text{ cm/s}$ dans le domaine [5, 10cm/s]

b- Angles des vecteurs moyens de paliers

Dans le domaine [50, 100cm/s], les angles des vecteurs moyens sont estimés avec une précision de :

- $\pm 1^\circ$ pour les aquadopps en coordonnées instrument
- $\pm 3^\circ$ pour l'aquadopp en coordonnées terrestres.

Cette précision se dégrade aux basses vitesses pour les 3 appareils :
à 5cm/s ($\pm 17^\circ$) et à 10cm/s ($\pm 5^\circ$)

c- Comparaison aux données constructeur

Pour nos configurations d'échantillonnage, l'algorithme Nortek de prédiction donne pour la précision des moyennes des composantes horizontales de palier :

$$\Delta U_{horizontal} \approx \pm 0.2 \text{ cm} / \text{s}$$

Ce calcul ne prend en compte que l'erreur instrumentale (Doppler).

La précision de nos mesures est de 3 à 5 fois inférieure . Justification possible :

- pour AQ2 (pivot, coordonnées XYZ), c'est la faible echo-intensité du signal qui bruite les mesures Doppler , surtout aux basses vitesses.
- Pour AQ3 (fixe , coordonnées XYZ), s'ajoute en plus du bruit Doppler le bruit dû aux vibrations de structures aux grandes vitesses, et à la turbulence de sillage lors des retours chariot.
- Pour AQ1 (fixe, coordonnées ENU), s'ajoute aux bruits précédents le bruit du compas, dû à l'environnement magnétique hétérogène. Remarquons que la conversion XYZ>ENU faite en temps réel par l'appareil à partir de ses mesures de tilt à 1hz, parvient à filtrer partiellement les vibrations mécaniques particulièrement fortes sur le roulis pour AQ1.

V- Conséquences en situation océanique

En situation océanique réelle , on pourra donc espérer retrouver les valeurs de précision constructeur en jouant sur les paramètres suivants :

- monter l'aquadopp sur pivot et pas directement clampé sur le cable (sillage, vibrations)
- soigner l'environnement magnétique (matériaux amagnétiques dans le bâti, éloignement du cable)
- éviter les grandes inclinaisons (aquadopp pas trop près du fond).
- Installer l' aquadopp sur la partie supérieure du mouillage pour maximiser la charge biologique de l'eau , donc l'echo intensité du signal .
- Optimiser la stratégie d'échantillonnage pour minimiser les écarts-type des moyennes tout en gardant l'autonomie batterie nécessaire .

Par exemple pour un déploiement de 2 ans dans la campagne Drake , différentes configurations sont envisageables :

Diagnos	Measure Interval	Averaging Interval	Measure load	Compass rate	nb days	Alkaline battery	Lithium battery	memory Mb (avail.9Mb)	précision (Nortek)	précision x 2	précision x3
	s	s	%	s	days	% 50wh	% 160wh		cm/s	cm/s	cm/s
24h	7200	300	4%	2	730	267%	83%	1	0,7	1,3	2,0
24h	7200	300	9%	2	730	381%	119%	1	0,5	0,9	1,4
24h	3600	300	4%	2	730	462%	144%	1.3	0,7	1,3	2,0

Commentaires :

- On utilise l'algorithme de « deployment planning » de Nortek .
- Il calcule une précision sur les vitesses horizontales pour un rapport signal/bruit optimum de 90 db.
- Nous appliquons un facteur 3 à cette précision ,ce qui correspond à nos résultats bassin ($S/N = 10$ db)
- Nous supposons arbitrairement que les conditions dans le Drake à 300m de profondeur seront intermédiaires ($S/N = 50$ db, 135 counts instrument) donc grossièrement un facteur 2 sur la précision Nortek.
- Dans ces conditions, la configuration en jaune fournit une mesure bi-horaire avec une précision de 1.3 cm/s, et une marge de 17% pour l'autonomie batterie Lithium sur les 2 ans.
- Les autres configurations testées dépassent la capacité de batterie.

Chapitre 3 : Calibration des Aanderaas

I- Configuration des Aanderaas

Les 2 courantomètres testés sont des Aanderaas RCM7 avec rotor Savonius. On notera dans la suite :

AAD1 = Aanderaa n° 2893, AAD2 = Aanderaa n° 3414

Les 2 sont configurés de façon identique pour la fixation et l'échantillonnage :

Configuration géométrique:

Ils sont fixés verticalement sur un poteau, ligne de foi dans l'axe du bassin, et ROTOR VERS LE BAS (afin d'éviter que les rotors soient dans le sillage de la structure porteuse). On a donc dû inverser les compas dans les corps des courants (haut/bas et rotation de 180° sur la ligne de foi).

Configuration d'échantillonnage:

L'intervalle de mesure est fixé à 30s. D'après la doc constructeur, il y aurait alors un échantillonnage interne chaque 12s pour le compas et le rotor, avec moyenne vectorielle inscrite sur 10bits dans la DSU chaque 30s.

I- Traitement des données

II-1 Traitement des fichiers bruts

Chaque AAD fournit un fichier (*.txt) pour l'ensemble des runs.

Dans le fichier brut, on traite les données rotor (N) et compas (M) à partir des corrélations suivantes :

$$\text{Cap compas } C \text{ en degrés : } C = 1 + 0.35 * M$$

$$\text{Module de vitesse } U \text{ en cm/s : } U = A + B * N$$

	A	B
AAD1	1,75	0,270
AAD2	1,59	0,273

Les valeurs des paramètres A et B sont tirées des derniers étalonnages de vitesse rotor établis au bassin d'IFREMER.

On extrait ensuite la série temporelle pour C et U correspondant au Run n°1, que l'on visualise graphiquement (figure 1).

Commentaires :

Les 4 paliers de vitesse à 5, 10, 25 et 50 cm/s apparaissent clairement sur les graphes U(t) avec un bruit sur les échantillons 30s beaucoup plus faible que pour les mesures Aquadopp (échantillons 3s moyennés à 30s) données à titre comparatif.

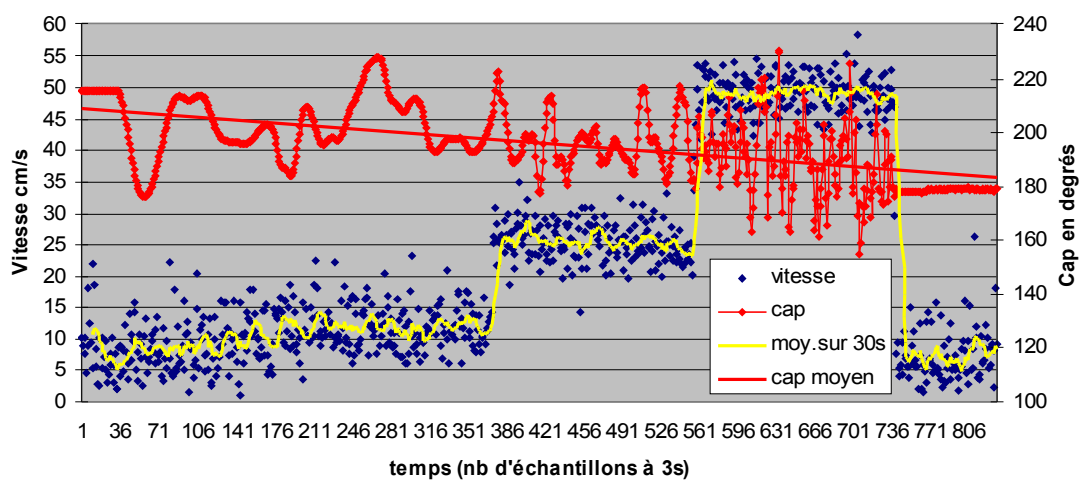
Les caps compas sont fortement bruités pour les 3 courants : la cause en est l'environnement magnétique très hétérogène du bassin, qui affecte les mesures en déplacement (au point fixe les compas sont stables, heureusement ...).

Conséquence :

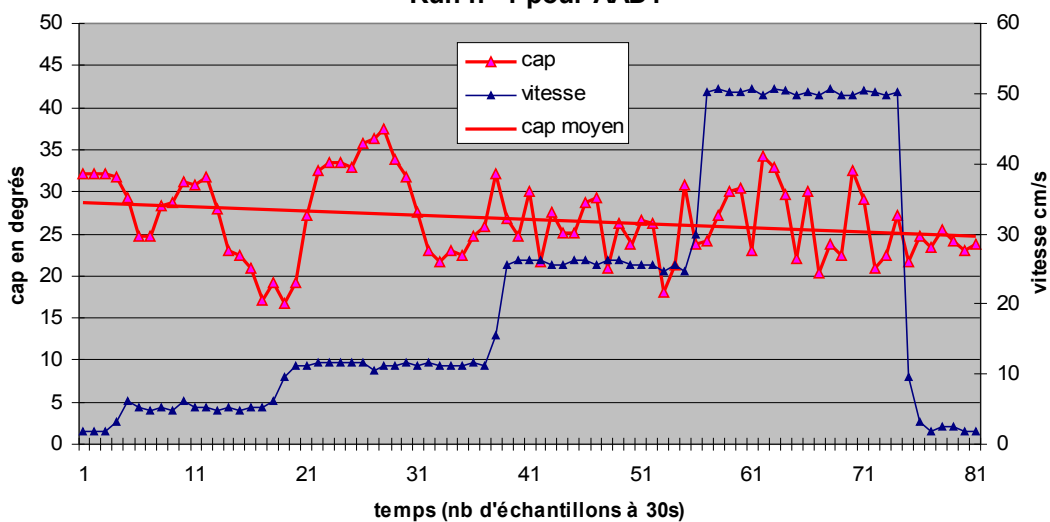
Afin de ne pas parasiter les mesures de vitesse par le bruit non significatif du compas, nous analyserons, dans ce rapport, le seul module U des vitesses AAD et non pas les composantes terrestres Ux (East) et Uy (North). Nous comparerons ces résultats à ceux de l'Aquadopp AQ3 travaillant dans des conditions similaires (montage fixe, coordonnées instrument XYZ).

En annexe 1 nous donnons également l'analyse des résultats des 2 Aanderaas exprimés en coordonnées terrestres, comparés à AQ1 (fixe, coordonnées terrestres ENU).

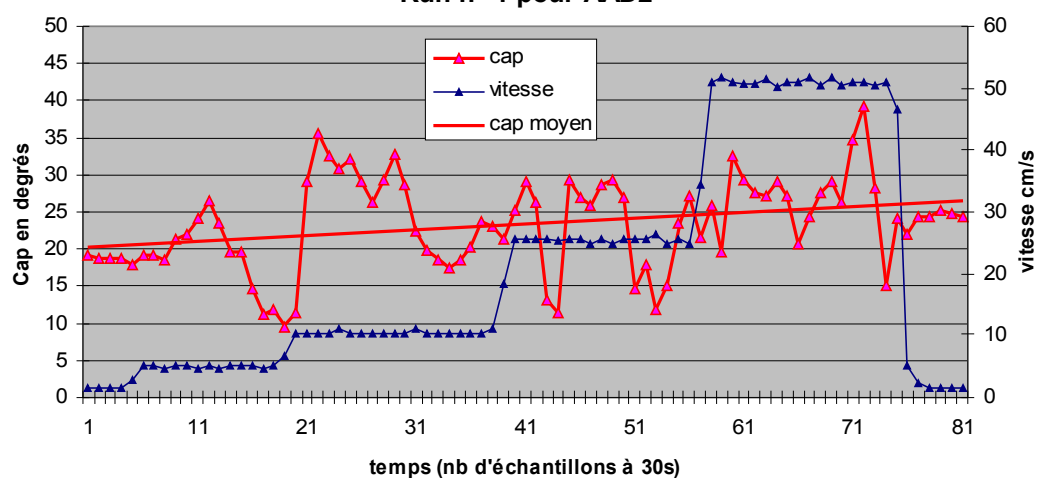
figure n°1 : Run n°1 pour AQ1 (fixe,ENU)



Run n° 1 pour AAD1



Run n° 1 pour AAD2



II-2 Analyse des modules de vitesse

II-2-1 Méthode

Du fichier global, on extrait chaque palier à vitesse constante, en éliminant les transitoires. Le nombre d'échantillons par palier varie entre 10 et 20. Les tests d'hypothèse et intervalles de confiance seront donc calculés avec des distributions de Student (et non avec une distribution gaussienne comme pour les populations Aquadopp beaucoup plus nombreuses).

Pour chaque population de palier on calcule une moyenne U et un écart-type $\sigma(U)$ du module de vitesse.

Puis on établit un intervalle de confiance avec spécification bilatérale sur cette moyenne, donnant le domaine d'incertitude absolue calculé ainsi pour la moyenne U :

$$\Delta U = t_{\alpha/2, N-1} * \frac{\sigma(U)}{\sqrt{N}}$$

avec :

- α , niveau de signification (=0.01, dans notre cas)
- $t_{\alpha/2, N-1}$, probabilité selon la loi de Student à (N-1) degrés de liberté.
- N, nombre d'échantillons du palier

On en déduit une incertitude relative $\frac{\Delta U}{U}$ sur la moyenne de palier.

II-2-2 Résultats et discussion

Les valeurs numériques de paliers pour AAD1, AAD2 et AQ 3 apparaissent dans le tableau n° 2.

Discussion sur les incertitudes absolues (figure 3)

Sur les graphes, elles apparaissent peu corrélées aux modules de vitesse ($0.2 < R^2 < 0.6$) et quasi constantes. L'incertitude moyenne pour les 2 AAD (0.33 cm/s) est de moitié inférieure à celle de l'aquadopp (0.7 cm/s).

Discussion sur les incertitudes relatives (figure 4)

Pour les 2 AAD, elles décroissent hyperboliquement de 6% à 5cm/s à moins de 1 % à partir de 50cm/s. Là encore, les Aanderas s'avèrent plus précis que l'Aquadopp, y compris aux basses vitesses.

Comparaison aux valeurs du constructeur

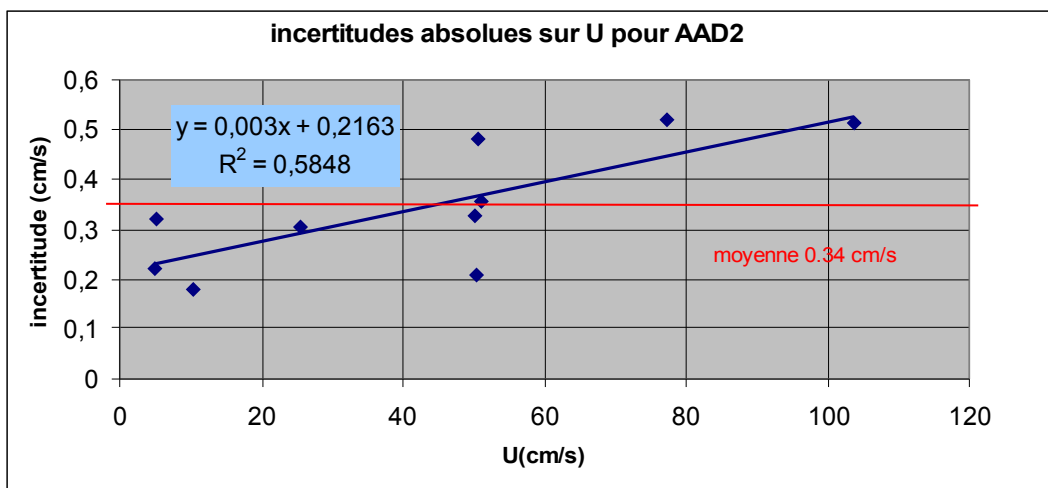
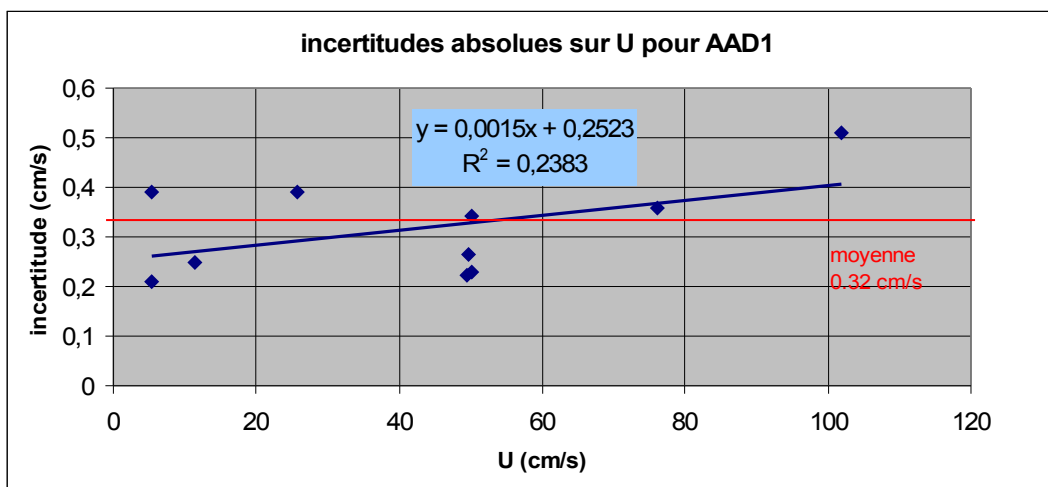
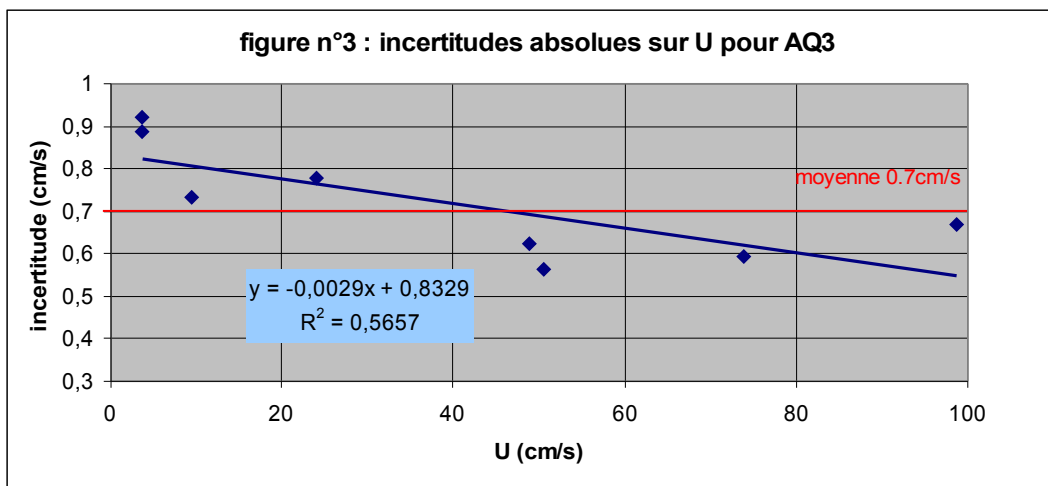
Aanderaa annonce une précision de :

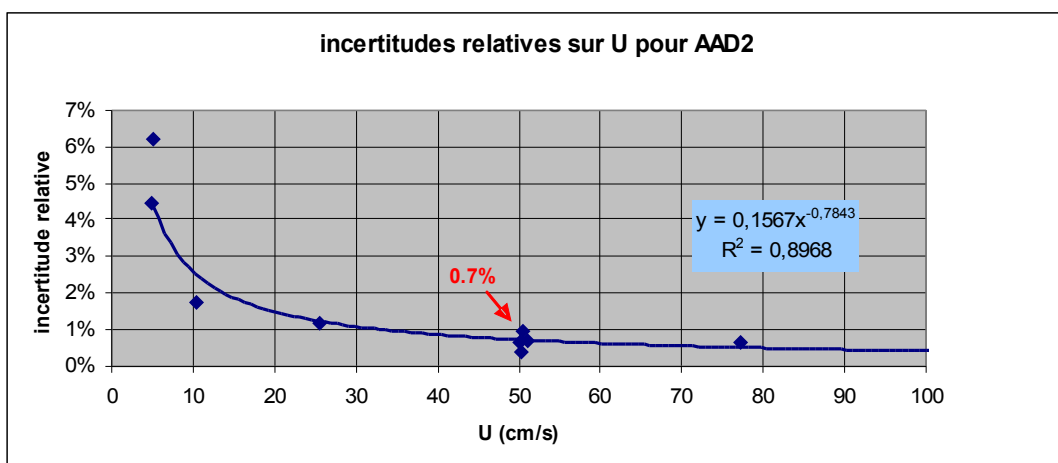
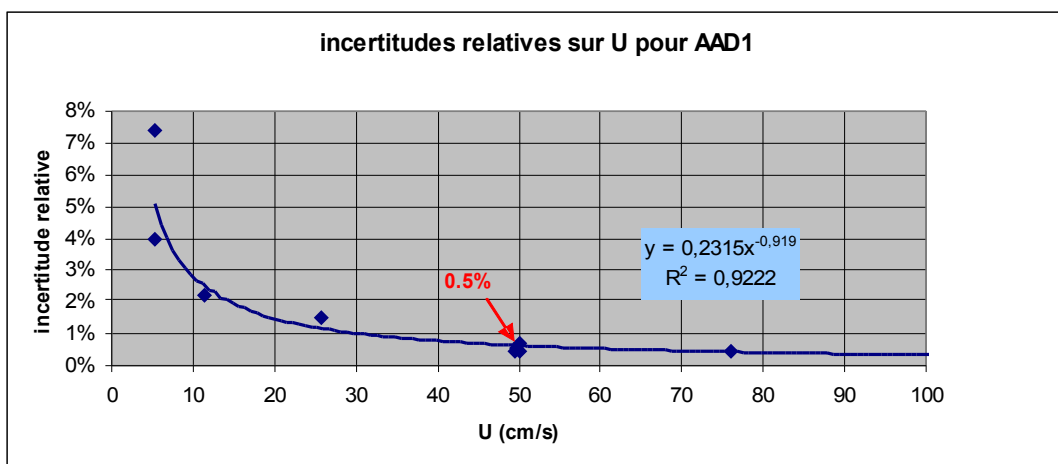
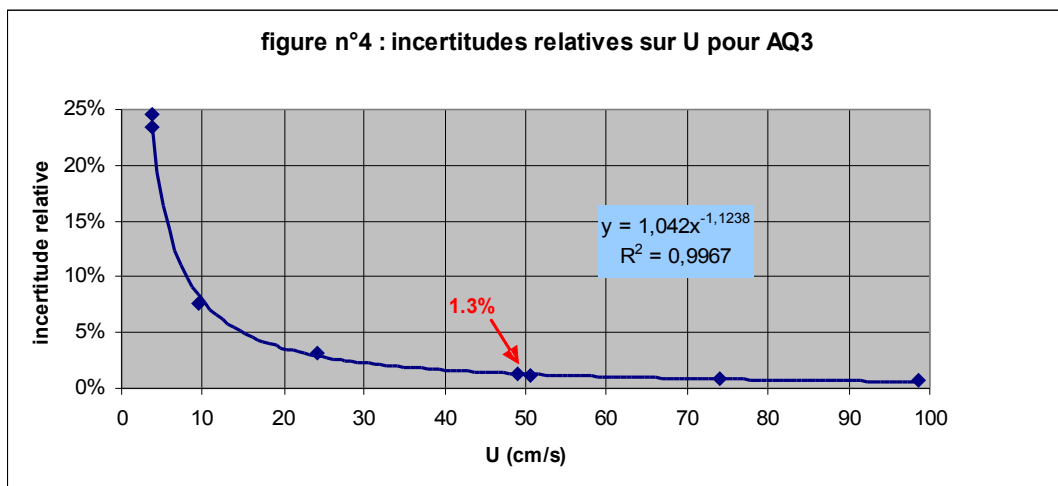
1cm/s ou 4% de la vitesse

Nos valeurs de palier sont donc meilleures. Mais rappelons que nous opérons en conditions idéales : fréquence d'échantillonnage maxi, courant en montage fixe dans un champ de vitesse stationnaire.

Tableau n°2 : Moyennes de palier des modules de vitesse

Couranto/ RUN	Moyenne chariot	N echant.	U moyen	U stdv	U Intcon f	Cap moyen	Cap stdv	Cap intconf
	cm/s		cm/s	cm/s	cm/s	°	°	°
AQ3								
au repos	0,00	363	0,69		0,50			
RUN1	5,08	117	3,80		0,89			
RUN2	5,08	160	3,74		0,92			
RUN1	10,15	183	9,57		0,73			
RUN1	24,97	170	24,12		0,78			
RUN1	49,72	170	48,97		0,62			
RUN2	74,59	197	73,96		0,59			
RUN3	99,45	153	98,71		0,67			
ret.chario t	49,73	192	50,57		0,56			
ret.chario t	49,73	173	50,73		0,58			
ret.chario t	49,73	83	50,73		0,83			
AAD1								
au repos	0,00	272	1,75	0,0	0,00	24,2	0,9	0,1
RUN1	5,08	14	5,28	0,5	0,39	25,7	4,7	3,8
RUN2	5,08	16	5,29	0,3	0,21	23,2	5,8	4,3
RUN1	10,15	18	11,40	0,4	0,25	29,0	5,8	3,9
RUN1	24,97	17	25,75	0,6	0,39	25,5	3,5	2,5
RUN1	49,72	17	50,14	0,3	0,23	26,9	4,6	3,2
RUN2	74,59	20	76,04	0,6	0,36	28,0	3,3	2,1
RUN3	99,45	15	101,87	0,7	0,52	26,9	2,7	2,1
ret.chario t	49,73	22	49,61	0,4	0,27	27,0	3,5	2,1
ret.chario t	49,73	9	50,11	0,3	0,35	24,6	5,1	5,7
ret.chario t	49,73	17	49,41	0,3	0,23	26,2	3,7	2,6
AAD2								
au repos	0,00	261	1,59	0,0	0,00	22,8	0,4	0,1
RUN1	5,08	13	4,97	0,3	0,22	19,3	4,5	3,9
RUN2	5,08	16	5,19	0,4	0,32	18,8	7,5	5,5
RUN1	10,15	18	10,42	0,3	0,18	25,5	6,7	4,6
RUN1	24,97	17	25,45	0,4	0,31	22,5	6,7	4,8
RUN1	49,72	17	51,00	0,5	0,36	27,3	5,6	4,0
RUN2	74,59	20	77,21	0,8	0,52	25,1	5,2	3,4
RUN3	99,45	15	103,84	0,7	0,51	26,1	4,7	3,6
ret.chario t	49,73	22	50,35	0,3	0,21	24,4	5,9	3,5
ret.chario t	49,73	9	50,55	0,4	0,48	27,3	7,4	8,3
ret.chario t	49,73	17	50,18	0,5	0,33	23,4	5,7	4,0





III- Calibration des vitesses Aanderaa sur les vitesses chariot

III-1 Méthode

Pour chaque palier de vitesse et pour chaque AAD :

- on compare le module moyen de palier à la vitesse-chariot, en appliquant une fonction erreur $(U_{palier} - V_{chariot})$ aux bornes de l'intervalle de confiance sur U , et en représentant la bande d'erreur graphiquement pour toute la série de runs.
- on analyse l'évolution de l'angle en représentant graphiquement la bande de confiance pour toute la série des runs.

Finalement on établit pour chaque AAD une courbe de calibration sous forme d'une corrélation linéaire : $U_{aad} = a.V_{chariot} + b$. On y applique une analyse de variance avec calcul d'erreur-type sur les prédictions.

III-2 Test d'erreur sur les modules

Les graphes de la figure 5 montrent pour AAD1 et AAD2 que :

- les mesures à l'arrêt ne sont pas validées, ceci étant dû à la constante de seuil de démarrage (1.6 et 1.8 cm/s).
- 5 paliers seulement sont validés pour AAD1, et 3 paliers pour AAD2 : les 2 courantos surestiment systématiquement les vitesses.
- ce biais augmente avec la vitesse, particulièrement pour AAD2 (figure 6) où l'erreur atteint 4.5 cm/s pour 1m/s.
- cette tendance n'apparaît pas pour les mesures par aquadopp.

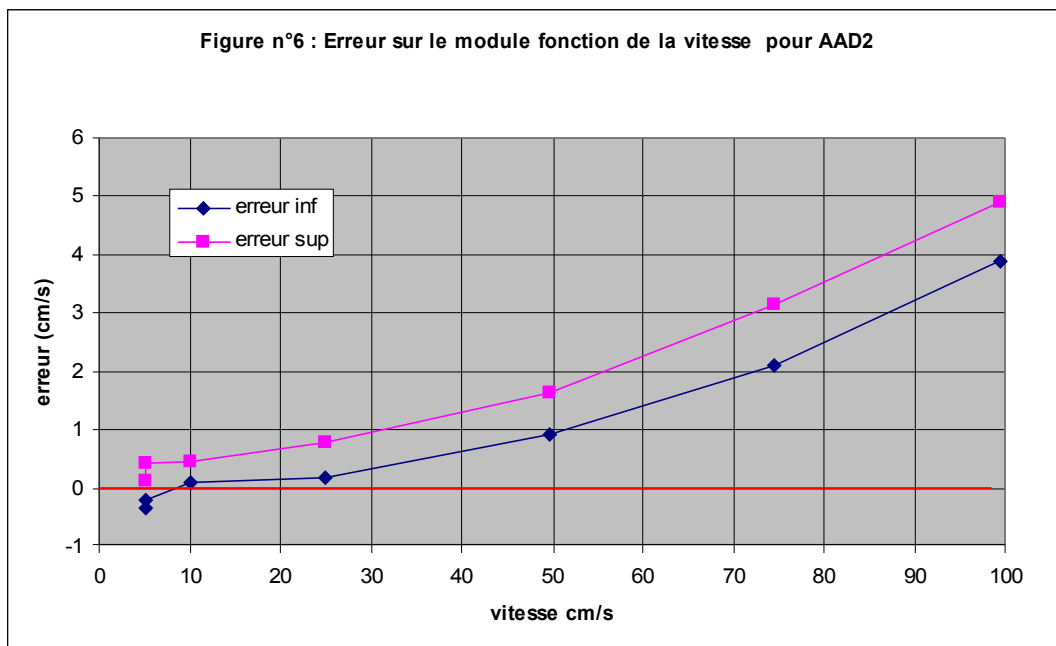
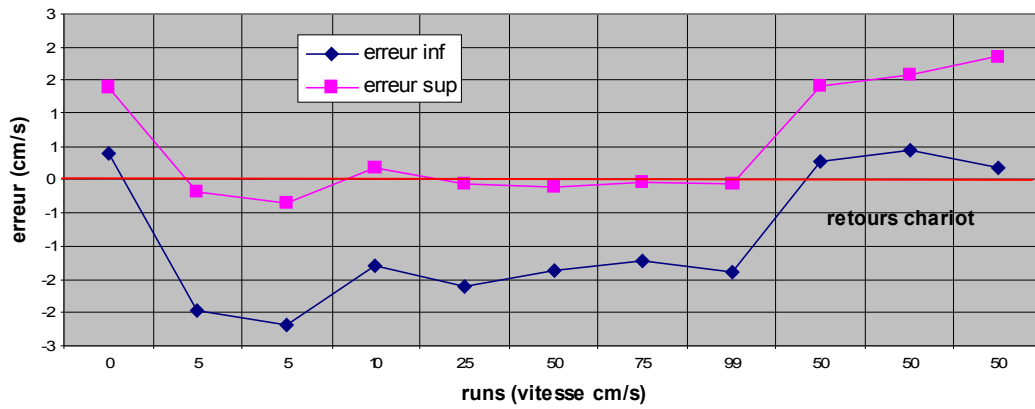
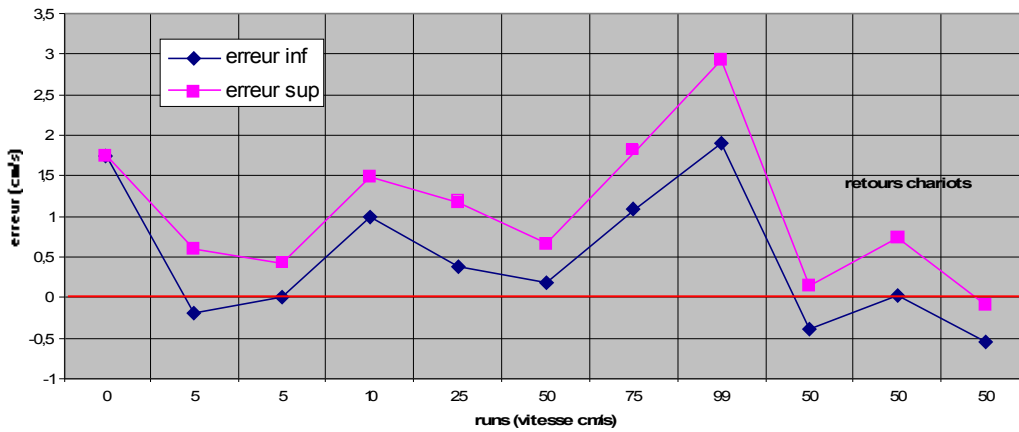


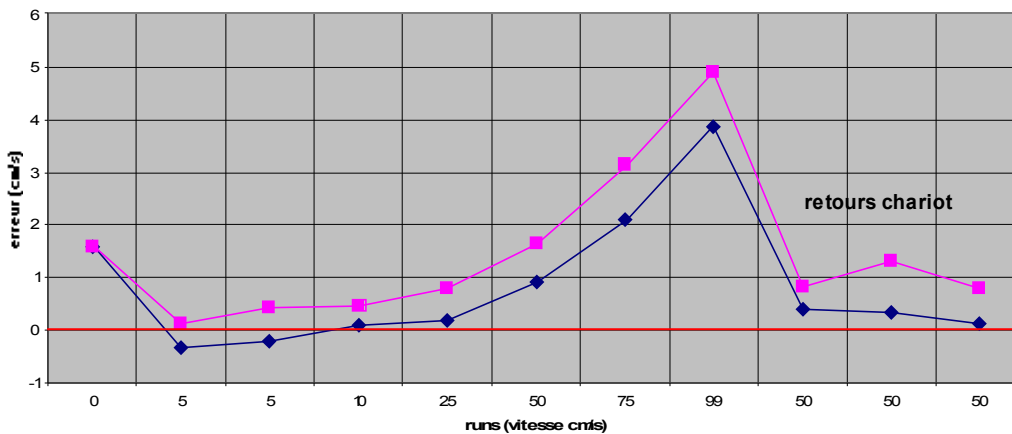
figure n°5 : Erreur sur le module pour AQ3 (fixe , coordonnées. XYZ)
 $\alpha=0.01$, $Err = V_{aqd} - V_{chariot}$



Erreur sur le module pour AAD1
 $\alpha=0.01$



Erreur sur le module pour AAD2
 $\alpha=0.01$



III-3 Corrélations d'étalonnage sur les modules

Par régression linéaire, on établit pour chaque Aanderaa une corrélation du type :

$$U_{\text{chariot}} = a.U_{\text{aad}} + b \quad \text{Vitesses exprimées en cm/s}$$

Les graphes apparaissent dans la figure 7, avec les rectangles d'incertitude (précision mesure courants en x, erreur type de prédiction en y) et le tableau qui suit donne les valeurs des paramètres des régressions.

Couranto	a	b	R ²	erreur type sur U (cm/s)	F=S/N
AQ3	0,9950	0,4273	0,9992	0,96	11100
AAD1	0,9915	-0,4392	0,9994	0,85	14213
AAD2	0,9683	0,1026	0,9994	0,86	13864

Les mesures à l'arrêt ont été invalidées par les tests d'hypothèse. On peut alors forcer la constante b à zéro dans les régressions et on obtient le tableau suivant :

Couranto	a	b	R ²	erreur type sur U (cm/s)	F=S/N
AQ3	1,0018	0,0000	0,9991	0,95	11251
AAD1	0,9847	0,0000	0,9996	0,66	23665
AAD2	0,9700	0,0000	0,9996	0,66	23770

Commentaires

- le coefficient de détermination (R²) et le rapport signal/bruit (F) sont très élevés. Les corrélations expliquent donc largement la variance expérimentale au niveau de signification $\alpha = 0.01$
- l'erreur type sur les valeurs de U prédites par les corrélations est de $\pm 0.7 \text{ cm/s}$ pour les Aanderaas, inférieure à la prédiction par Aquadopp ($\pm 1 \text{ cm/s}$).
- les pentes (avec b = 0) pour les 2 AAD sont légèrement inférieures à 1, particulièrement pour AAD2. On retrouve ici la signature du biais aux grandes vitesses.
- En fait la réponse des Aanderaa n'est pas rigoureusement linéaire (on peut le voir sur les droites d'étalonnage IFREMER). On pourrait donc forcer une régression polynomiale sur les points expérimentaux (figure 8 pour AAD2). Le coefficient du terme quadratique (-0.0005) ainsi que l'ordonnée à l'origine (-0.0983) restent très faibles, et l'analyse de variance est légèrement meilleure (R² = 0.9999 au lieu de 0.9994).

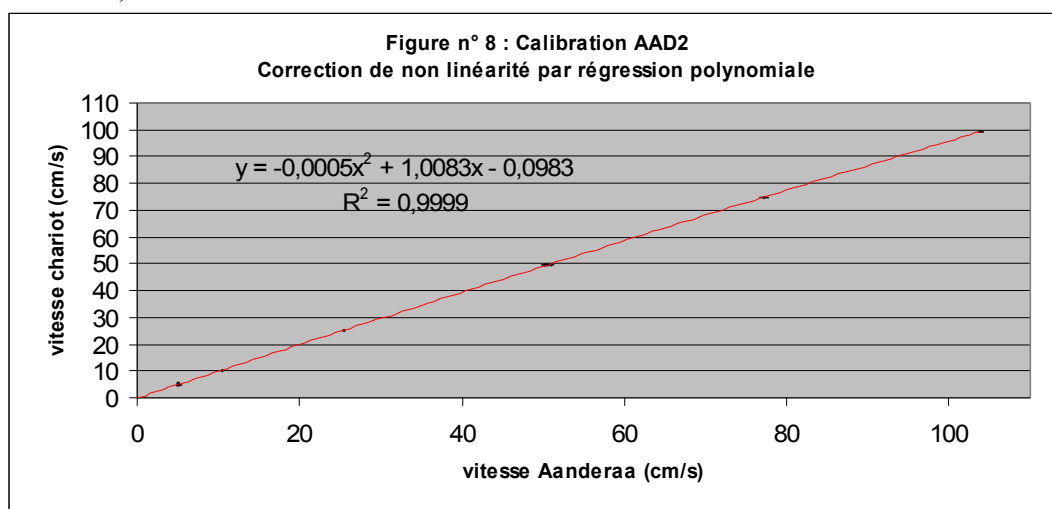
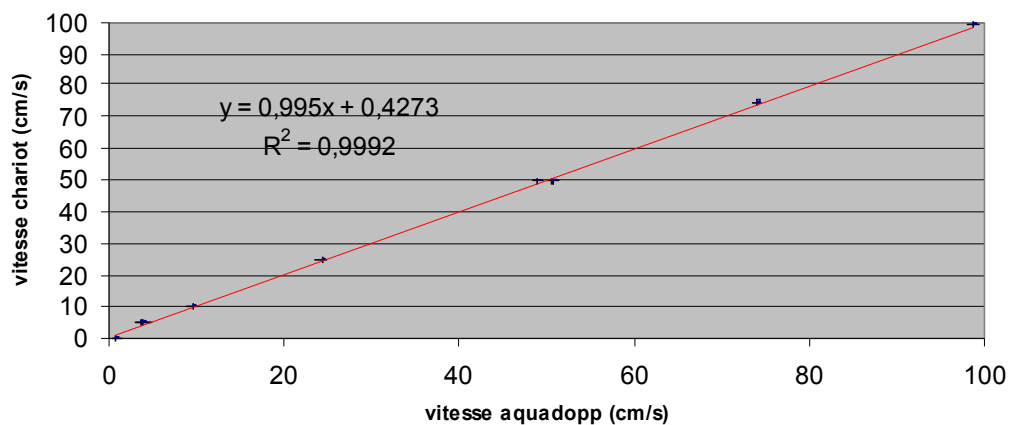
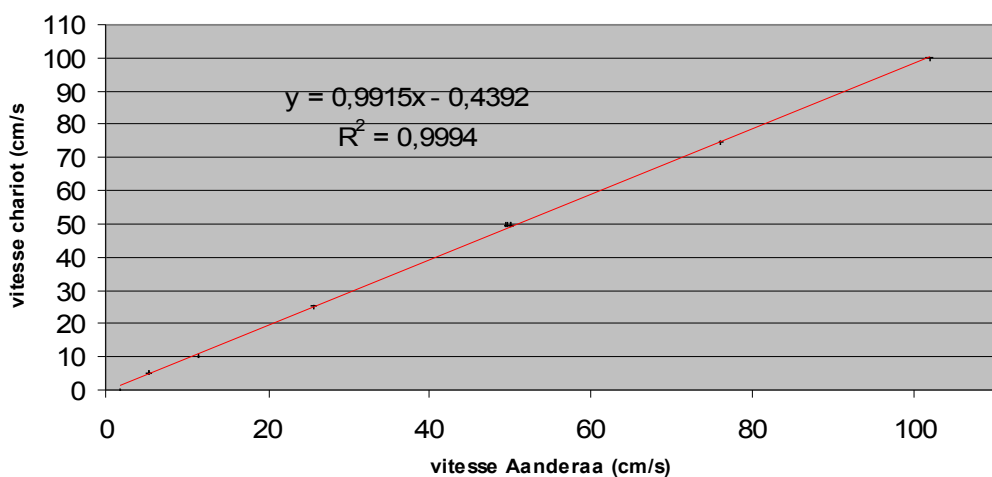


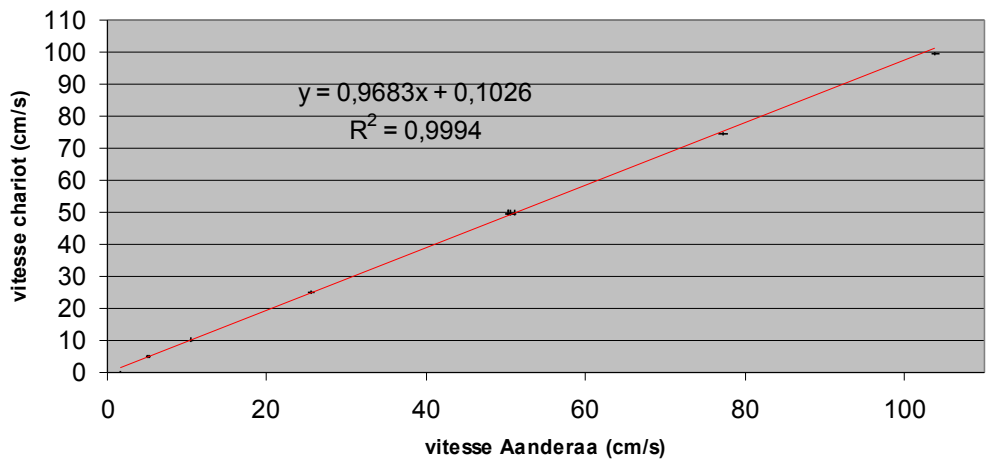
Figure n° 7 : Calibration AQ3 (fixe , coord. XYZ)



Calibration AAD1



Calibration AAD2



III-4 Conclusion sur la calibration en module des AAD

La précision moyenne des mesures AAD de vitesse (module) est de $\pm 0.4 \text{ cm/s}$ dans le domaine de vitesse $[5, 100 \text{ cm/s}]$. L'erreur-type de prédiction par les corrélations linéaires établies est de $\pm 0.7 \text{ cm/s}$.

On peut conclure que ces corrélations estiment le module des vitesses horizontales avec une précision meilleure que $\pm 1 \text{ cm/s}$ dans 99% des cas et pour tout le domaine de vitesse $[5, 100 \text{ cm/s}]$. Cette précision est égale, sinon légèrement meilleure que celle des aquadopp dans les mêmes conditions expérimentales.

La non linéarité de la réponse des rotors aux grandes vitesses induit un biais maxi de 4% à 100 cm/s. Une corrélation polynomiale n'est donc pas nécessaire puisque l'ajustement de pente des régressions linéaires (qui prend en compte ce phénomène) induit une erreur-type inférieure à la précision nominale.

IV-Analyse de confiance sur les caps compas

Les caps compas moyens pour chaque palier, munis de leur intervalle de confiance, sont donnés dans la figure 9.

La largeur de cet intervalle varie fortement d'un palier à l'autre à cause de l'hétérogénéité spatiale de la déviation magnétique le long du bassin (variations de 30° sur les échantillons à 30s, voire figure n°1).

Raisonnons sur l'ensemble des runs, on constate les valeurs moyennes suivantes :

- AAD1 : cap moyen = 26° (à $\pm 3^\circ$ d'incertitude moyenne)
- AAD2 : cap moyen = 24° (à $\pm 4^\circ$ d'incertitude moyenne)

(On rappelle que la ligne de foi des compas AAD est pivotée de 180° par rapport à l'axe instrument)

L'axe du bassin est à 14°E du Nord géographique. La déclinaison magnétique locale est de l'ordre de 3°W . Le chariot se déplace donc dans le 197° magnétique en marche avant. On peut en déduire des valeurs des déviations magnétiques des 2 compas, moyennées spatialement sur tout le bassin, et encadrées des variations maxi constatées sur les échantillons à 30s :

- AAD1 : déviation moyenne = 9°W à $\pm 15^\circ$ près
- AAD2 : déviation moyenne = 7°W à $\pm 15^\circ$ près

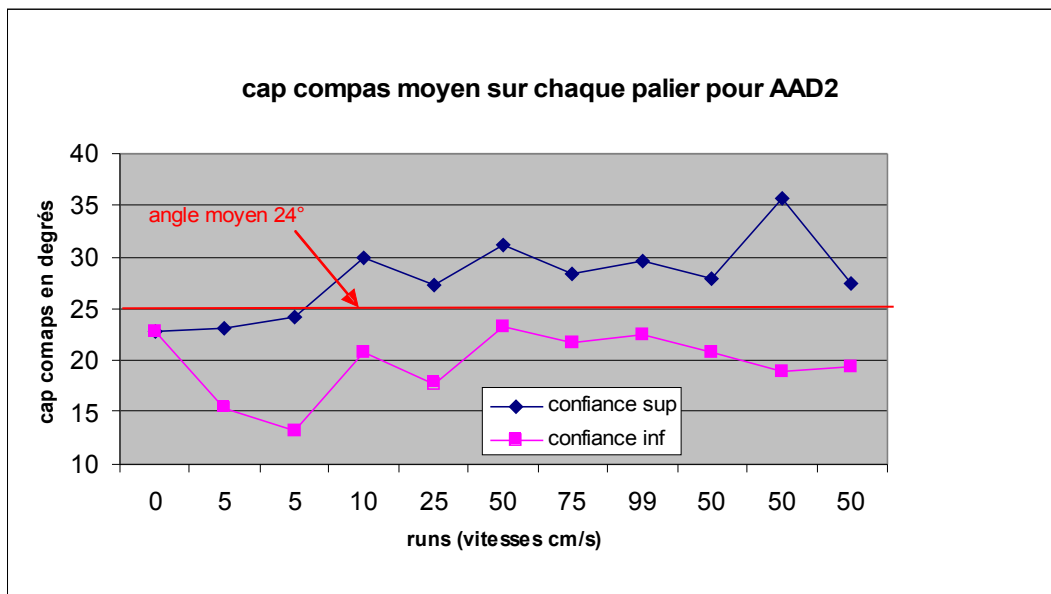
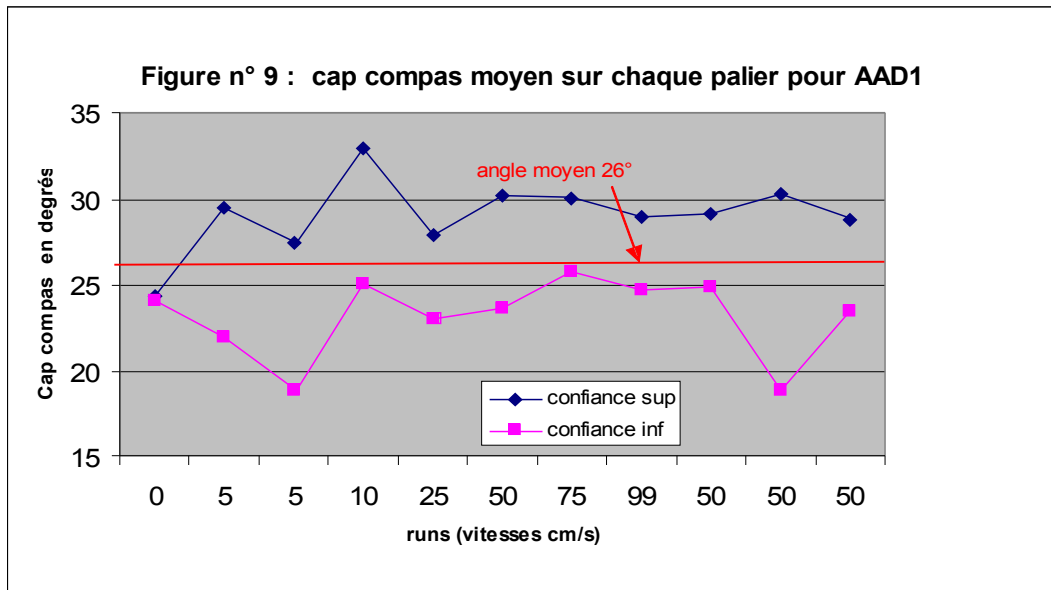
La même analyse menée sur les signaux compas de l'aquadopp AQ3 donne :

- AQ3 cap moyen = 191°
- déviation moyenne = 6°E à $\pm 30^\circ$ près (sur les échantillons 3s)

Il est plausible que les déviations calculées soient différentes pour les 3 courantomètres car :

- ils sont espacés sur 12m dans la largeur du bassin.
- La technologie des compas AAD (à rose magnétique) et AQ (fluxgate) est intrinsèquement différente.
- Le calage à zéro des lignes de foi des courants sur leur poteau a été réalisé à vue, à quelques degrés près.

En annexe 1, l'analyse des composantes terrestres des vitesses AAD montre que le bruit des signaux compas généré par ces déviations fortes et stochastiques dégrade la précision des mesures, mais pas l'exactitude des valeurs moyennes.



Annexe 1 : Exploitation des données Aanderaa en coordonnées terrestres

I- Méthode et objectifs

A partir du fichier brut des modules et caps compas , on calcule les composantes East (Ux) et North (Uy) de la vitesse horizontale chaque 30s, sur lesquelles on mène l'étude des paliers de vitesse.

Les résultats de AAD1 et AAD2 sont comparés à ceux de l'aquadopp AQ1 , qui fonctionne en conditions similaires : montage fixe , coordonnées ENU.

Le but est d'identifier la dégradation de précision et d'exactitude de mesure induite par le bruit des signaux compas très perturbés par l'environnement magnétique .

II- Résultats et commentaires

Les résultats apparaissent sur les figures 1 à 5.

II-1 Incertitudes absolues et relatives sur les composantes (figure 1 et 2)

Elles sont faiblement corrélées à la composante principale Uy , mais nettement croissantes avec la composante faible Ux . Elles atteignent des valeurs de $\pm 5 \text{ cm/s}$ pour le palier à 50cm/s.

Il en résulte que les incertitudes relatives ne sont pas corrélées aux vitesses et varient assez aléatoirement entre 2 et 20%.

Par comparaison aux précisions obtenues par les Aanderaas sur les modules seuls, et par les Aquadopps sur les modules et les composantes horizontales ($< 1 \text{ cm/s}$ ou 4%), *on peut conclure que le bruit des signaux compas dégrade la précision des mesures AAD d'un facteur 5.*

II-2 Erreurs sur les modules (figure 3)

Les intervalles de confiance étant fortement élargis par la baisse de précision , tous les paliers (hors vitesse nulle) sont validés par le test .

Conclusion : compte tenue du large domaine d'incertitude sur l'estimation des modules , toutes les mesures restent exactes .

Notamment le biais de non-linéarité aux grandes vitesses, mis en évidence dans l'étude précédente, se retrouve complètement noyé dans le bruit magnétique .

II-3 Erreurs sur les angles vectoriels(figure 4)

Les AAD étant fixes par rapport à l'axe de déplacement , les conclusions déjà tirées de l'analyse des cap compas (§ IV) sont inchangées pour les angles des vecteurs vitesse.

II-4 Droites de calibration (figure 5)

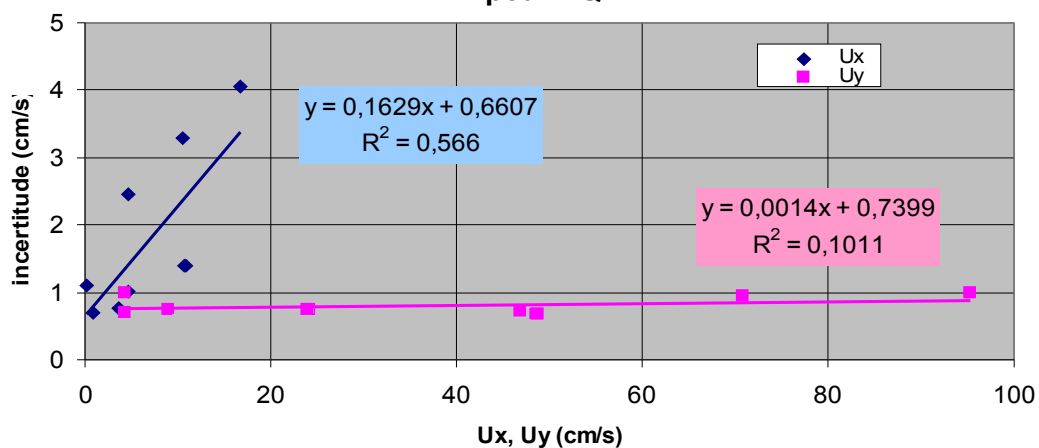
couranto	a	b	R^2	erreur type sur U (cm/s)	F=S/N
AQ1	1,0265	0,0000	0,9992	0,96	10921
AAD1	0,9996	0,0000	0,9987	1,16	7540
AAD2	0,9964	0,0000	0,9985	1,25	6559

Elles restent fiables : R^2 et F restent élevés, les estimations sont donc exactes et l'erreur-type de prédiction reste inférieure à 1.3 cm/s.

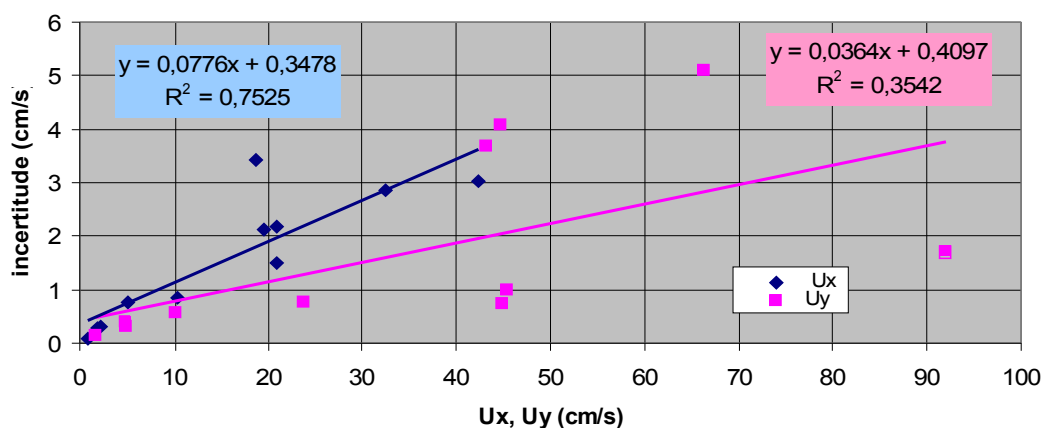
Mais les barres horizontales d'incertitude (précision des mesures AAD) s'accroissent fortement aux grandes vitesses.

On conclut que les AAD ainsi calibrés en coordonnées terrestres peuvent prédire les modules de vitesse à $\pm 10\%$ près.

**Figure n°1 : incertitudes absolues sur Ux (East) et Uy(North)
pour AQ1**



incertitudes absolues sur Ux (East) et Uy(North) pour AAD1



incertitudes absolues sur Ux (East) et Uy(North) pour AAD2

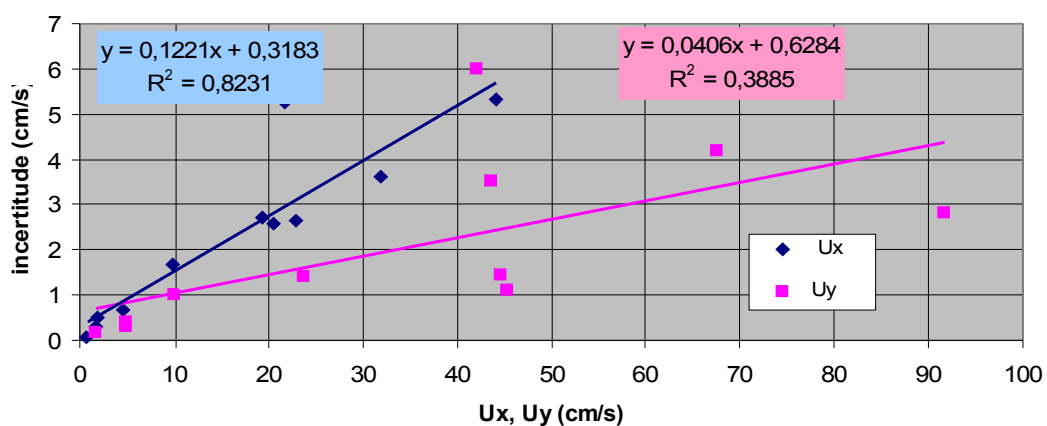
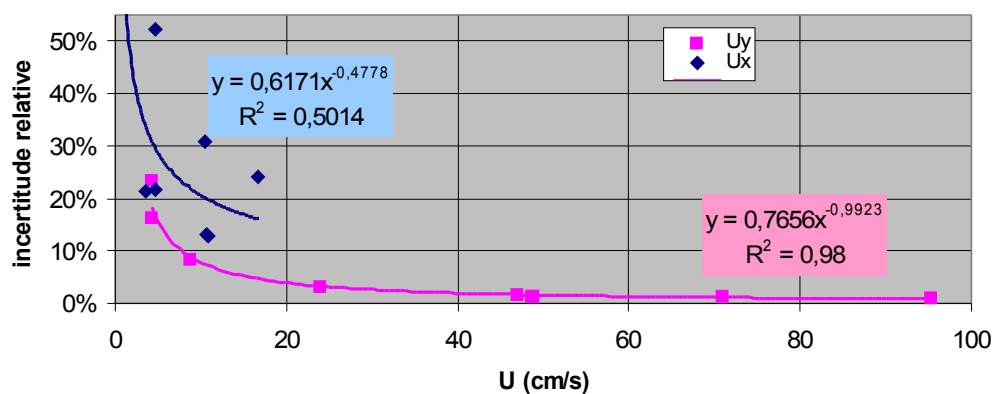
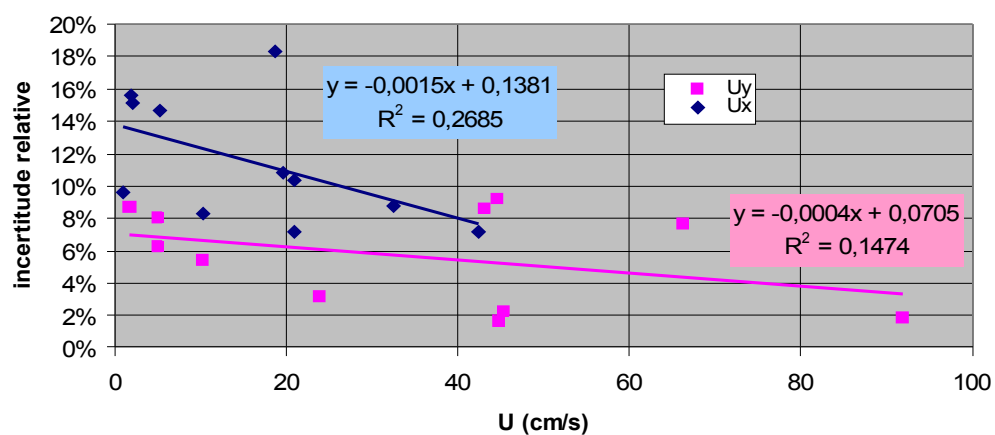


Figure n°2 : incertitudes relatives sur Ux (East) et Uy (North) pour AQ1



incertitudes relatives sur Ux (East) et Uy (North) pour AAD1



incertitudes relatives sur Ux (East) et Uy (North) pour AAD2

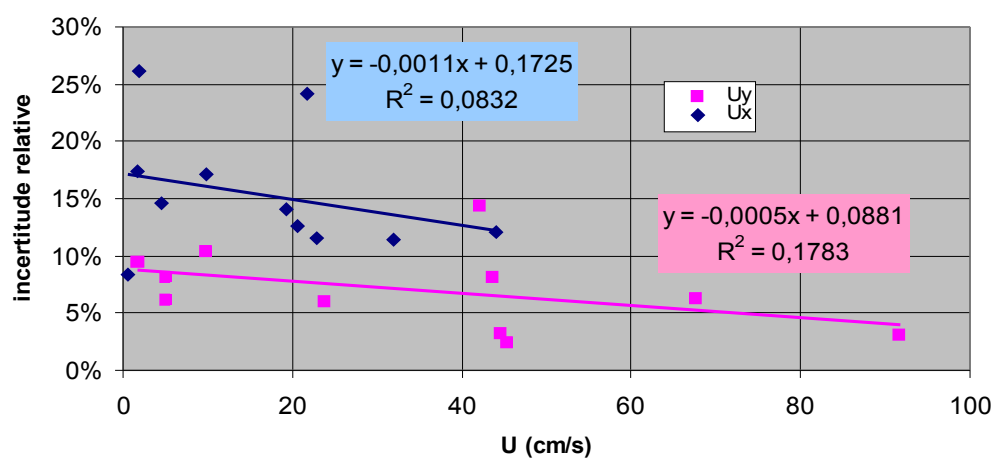
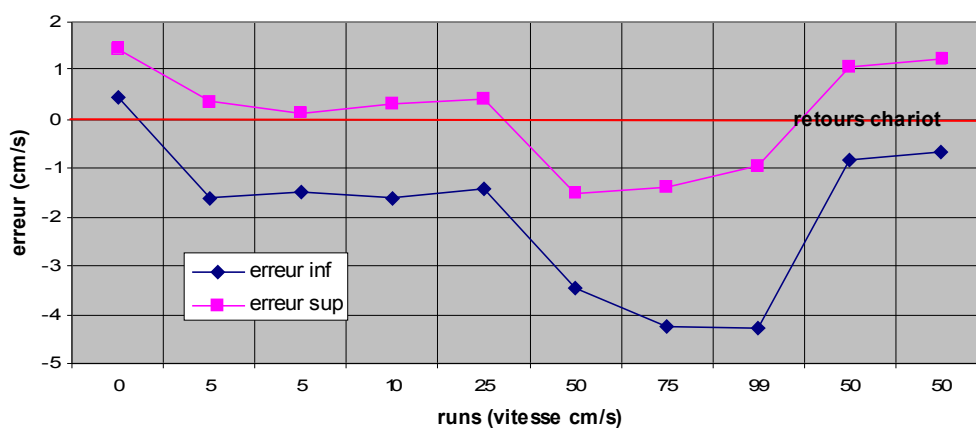
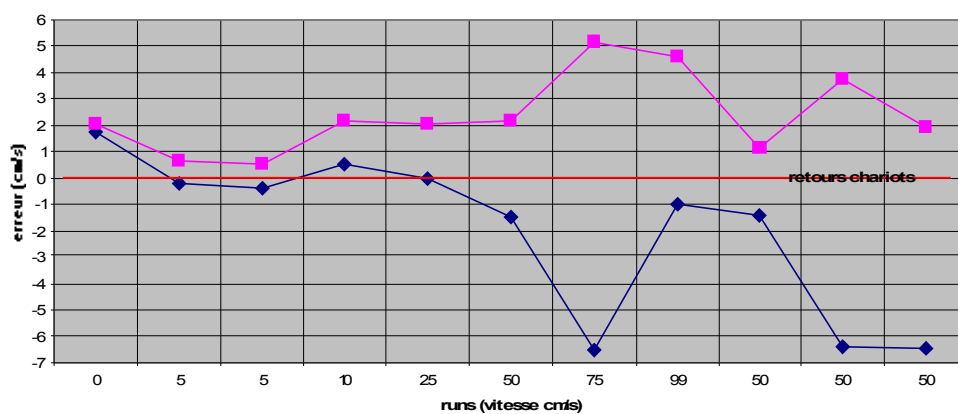


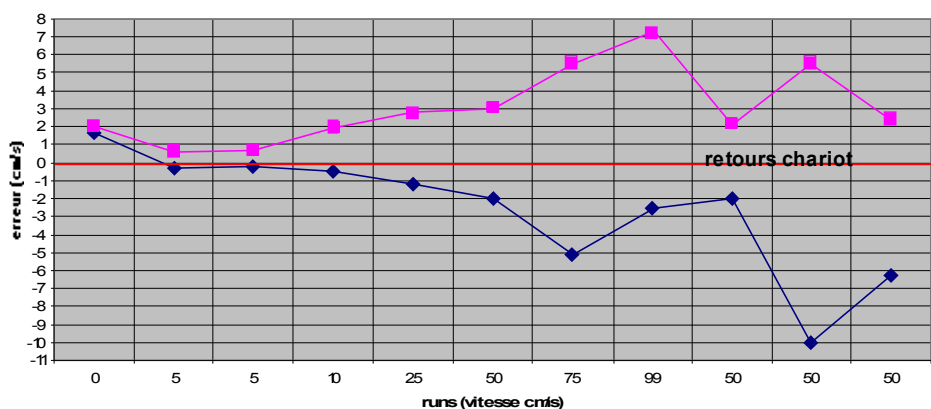
Figure n°3 : Erreur sur le module pour AQ1 (fixe , coordonnées. ENU)
 $\alpha=0.01$, $Err = V_{aqd} - V_{chariot}$



Erreur sur le module pour AAD1(coordonnées EN)
 $\alpha=0.01$



Erreur sur le module pour AAD2 (coordonnées EN)
 $\alpha=0.01$



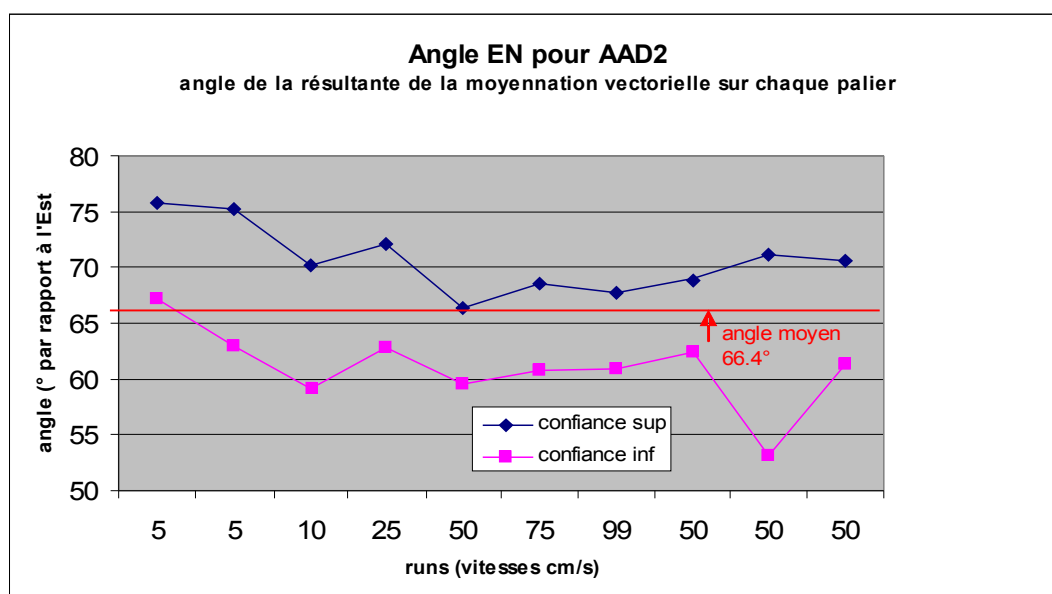
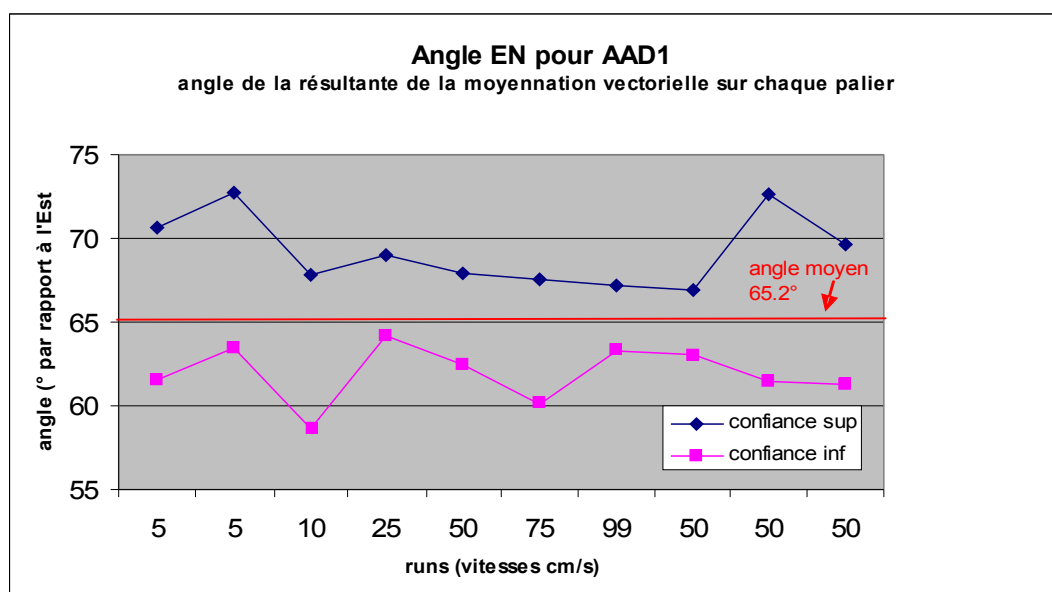
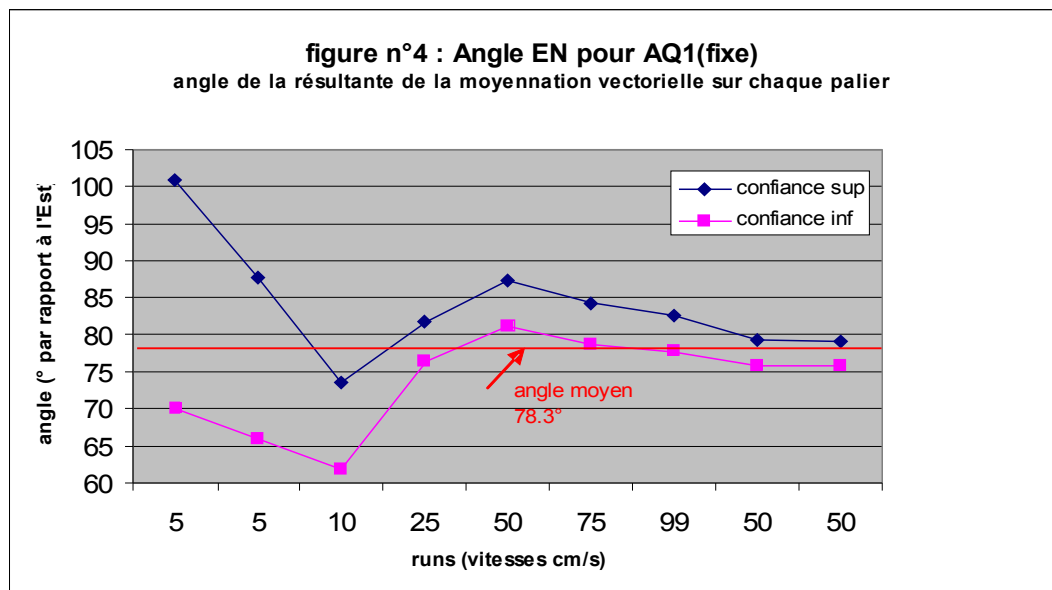
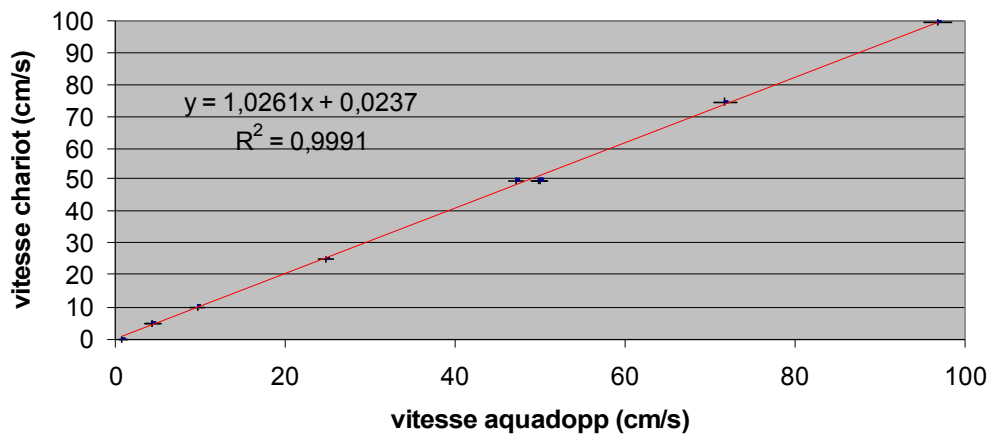
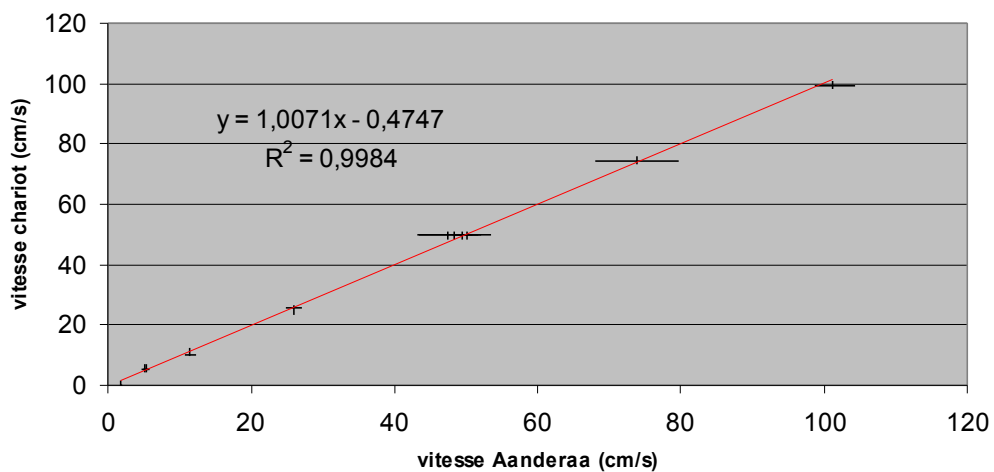


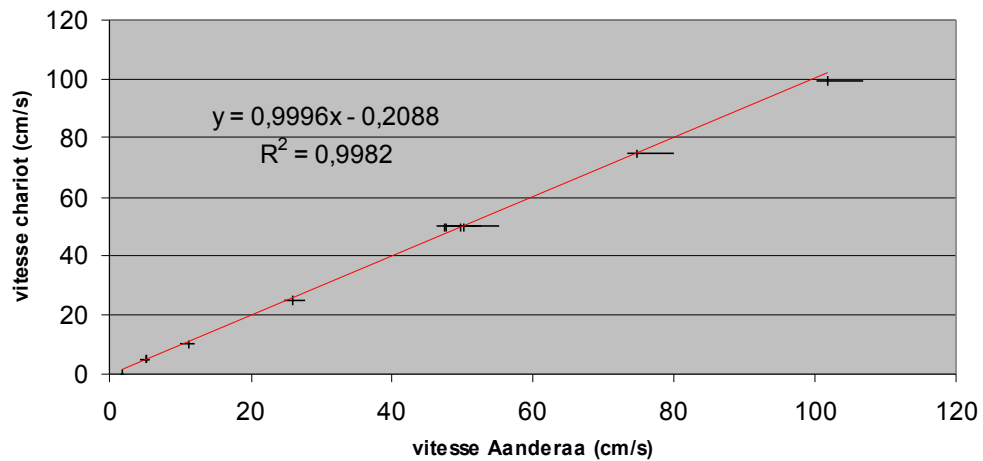
Figure n° 5 : Calibration AQ1 (fixe , coordonnées ENU)



Calibration AAD1 (coordonnées EN)



Calibration AAD2 (coordonnées EN)



Annexe 2 : Estimation des vitesses chariot

I- Commentaires sur les fichiers bruts

Ils sont fournis par le bassin à partir de la centrale de traitement du chariot.

- les temps de référence sont assez confus , on traite donc palier par palier sans en tenir compte.
- les fichiers de quelques runs sont manquants (2 retours chariots et un run à 5 cm/s. Dans les calibrations , on utilise alors les statistiques vitesse chariot d'autres runs de même vitesse de consigne (hypothèse justifiée par la grande stabilité des mesures).
- La fréquence d'échantillonnage des vitesses prend 2 valeurs : 8 Hz pour les basses vitesses (5,10,25), 80 Hz pour les autres . Mais cette règle n'est pas toujours respectée (cf tableau).

II- Traitement des données

II-1 Méthode

Dans chaque fichier on isole les séries correspondant à chaque palier de vitesse constante avec filtrage généreux des transitoires . Sur chaque série on calcule une moyenne et un écart-type. Les populations étant élevées (plusieurs milliers d'échantillons), on calcule un intervalle de confiance sur les moyennes avec spécification bilatérale et niveau de signification $\alpha=0.01$

II-2 Résultats et commentaires

Vitesses chariot					
palier	moyenne	stdv	N	f	Inter. confiance
	cm/s	cm/s	echantillons	Hz	cm/s
5	5,0765	0,0923	3300	8 hz	0,0041
10	10,1514	0,1043	3900	8 hz	0,0043
25	24,9665	0,0766	6300	8 puis 80 hz	0,0025
50	49,7199	0,1187	42000	80hz	0,0015
5	5,0765	0,0923	0		
75	74,5888	0,2021	4130	8hz	0,0081
100	99,4504	0,2432	37000	80 hz	0,0033
RC1 50	49,7275	0,0812	0		
RC2 50	49,7275	0,0812	2400	8hz	0,0043
RC3 50	49,7271	0,1200	2400	8hz	0,0063

Les écarts-type sur chaque palier sont fonction croissante de la vitesse moyenne , entre 0.1 et 0.25 cm/s (figure 1, corrélation à 0.88).

Comme la fréquence d'échantillonnage augmente à 80hz pour les vitesses élevées, l'incertitude absolue (intervalle de confiance) sur les moyennes reste sensiblement indépendante des plages de vitesse (figure 2, corrélation à 0.04) : 0.004 cm/s en moyenne pour un niveau de signification de $\alpha = 0.01$

Exception faite du palier à 75cm/s, échantillonné sans raison connue à 8 hz.

III- Conclusions

- Les moyennes de vitesses sur chaque palier sont des estimations des vitesses chariot à moins de 0.008 cm/s près dans 99% des cas.
- Etant donnée la précision très inférieure des mesures de vitesse par nos courantomètres, nous pouvons considérer (pour nos calibrations) que ces moyennes de palier sont des estimateurs rigoureux et sans biais des vitesses chariots réelles.
- Les moyennes de palier diffèrent légèrement des valeurs de consigne (jusqu'à 0.55cm/s).

