

LE GLAND Guillaume

Laboratoire d'accueil : LOCEAN, 4 place Jussieu, 75005 Paris

Encadrement : Pierre Testor (CR CNRS), Anthony Bosse (doctorant)

Projet personnel de recherche :
Calcul de vitesses verticales de l'eau en Méditerranée à
partir de données de gliders

Introduction

De décembre 2013 à début mars 2014, j'ai étudié, dans le cadre d'un projet personnel de recherche, les données collectées par un planeur océanique sous-marin (ou « glider »), dénommé « campe », qui a été déployé dans le Golfe du Lion du 17 janvier au 19 mars 2013. Le but était d'exploiter les données fournies par le glider pour estimer les vitesses verticales de l'eau de mer. Celles-ci sont généralement faibles ($<1\text{cm.s}^{-1}$), mais peuvent devenir significatives lors des événements de convection profonde ($\pm 10\text{cm.s}^{-1}$, concentré dans des chemins convectifs, ou « plumes ») comme ceux qui agitent le golfe du Lion en hiver, lors d'événements de fort Mistral ou de Tramontane. C'est ce processus de mélange vertical qui renouvelle les eaux profondes de la Méditerranée occidentale.

Les gliders sont des engins sous-marins autonomes qui effectuent des cycles de montée et descente entre la surface et une profondeur maximale de 1000m (voire plus pour des modèles en développement). La compression ou la détente d'une vessie remplie d'huile, au moyen d'une pompe, leur permet de faire varier leur volume et ainsi de couler ou bien de remonter à la surface. Contrairement aux profileurs Argo qui se laissent entraîner par les courants à une profondeur donnée, les gliders disposent d'ailes qui leurs permettent de « planer », c'est-à-dire d'acquérir une vitesse horizontale à partir des forces verticales. On peut donc les diriger en leur donnant des « waypoints » à atteindre. C'est en surface qu'ils reçoivent leurs instructions et transmettent leurs données, au moyen de leur antenne satellite. Il existe actuellement 4 principaux modèles de glider : Slocum, Seaglider, Spray et Sea Explorer. Campe est un glider de type Slocum.

Un glider pèse dans l'air autour de 50kg, mesure de l'ordre de 1,5m de long pour environ 20cm de diamètre. Il effectue des cycles de 4h pour une plongée à 1000m (sur une distance d'environ 4km). Les gliders sont basiquement équipés de capteurs de pression, de température et de conductivité (renseignant la salinité de l'eau), mais peuvent aussi embarquer une série de capteurs biogéochimiques mesurant l'oxygène dissous, la fluorescence (un indicateur de la concentration en chlorophylle), la turbidité ou bien encore la concentration en nutriments. Lors de chaque plongée, un glider est dévié par des courants horizontaux dont il est capable d'estimer la valeur moyenne sur la profondeur de la plongée, en comparant sa position réelle, obtenue par le positionnement satellite, et l'estimation de sa position obtenue par ses données de navigation.

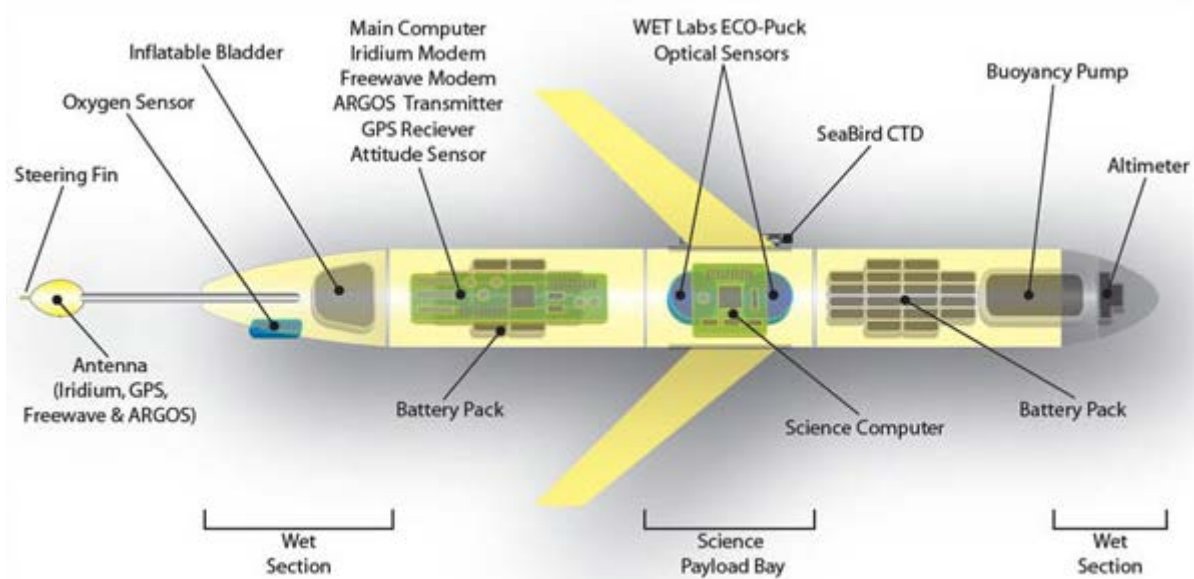


Figure 1 : Schéma technique d'un glider de type Slocum

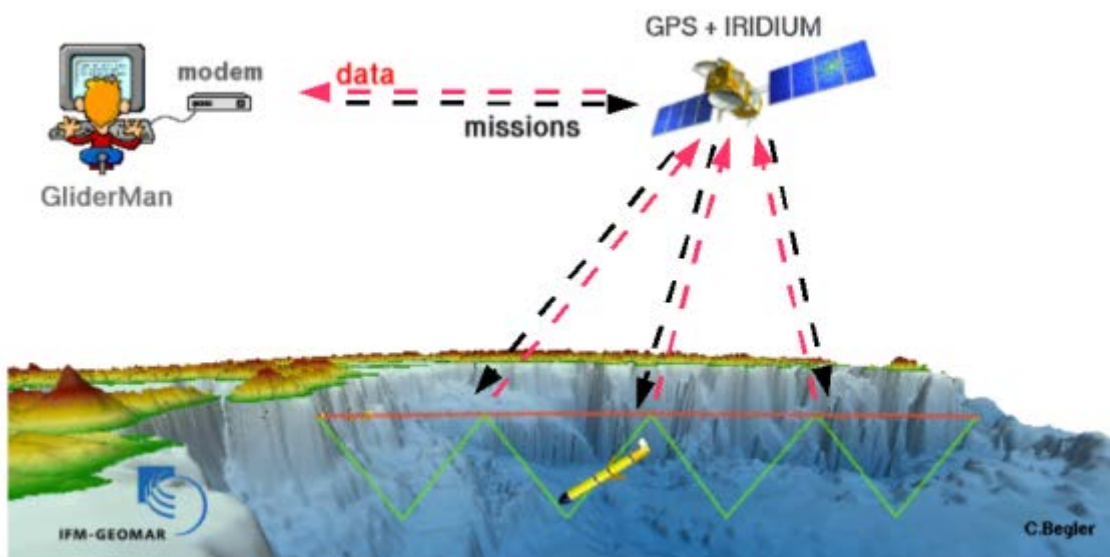


Figure 2 : Cycle d'échantillonnage d'un glider

Méthode de détermination des vitesses verticales

La vitesse verticale d'un glider par rapport à la Terre est estimée grâce à son capteur de pression. En effet, la pression étant directement proportionnelle à la profondeur, sa dérivée renseigne sa vitesse verticale. Cette vitesse verticale peut être décomposée en deux parties, l'une liée aux paramètres de vol du glider et l'autre étant d'origine océanique. Un modèle de vol peut fournir une estimation du déplacement du glider par rapport à la masse d'eau dans laquelle il se déplace en supposant l'absence de mouvements verticaux. Celle-ci est déterminée à partir de l'inclinaison du glider par rapport à l'horizontale, appelée pitch, du volume d'huile pompé, et de constantes mécaniques liées au glider. La différence des deux vitesses est donc égale à la vitesse verticale de l'eau de mer.

Le modèle de vol est basé sur l'idée que le vol est quasi-stationnaire, c'est-à-dire que les forces exercées sur le glider se compensent. On en compte 4 : la gravité F_g (constante), la poussée d'Archimède F_B (qu'on fait osciller entre deux états correspondant à la montée et à la descente), la portance F_L et la traînée F_D . On écrit alors la compensation des forces sur l'horizontale et sur la verticale (voir figure 3). On note U la vitesse totale du glider, θ le pitch, γ l'angle du glider, c'est-à-dire l'angle que fait sa trajectoire avec l'horizontale, et α l'angle d'attaque, défini par $\alpha = \gamma - \theta$. Ceci donne :

$$F_B - \cos(\gamma)F_L(\alpha, U) - \sin(\gamma)F_D(\alpha, U) - F_g = 0(\text{verticale})(1)$$

$$\cos(\gamma)F_D(\alpha, U) - \sin(\gamma)F_L(\alpha, U) = 0(\text{horizontale})(2)$$

Dans ces équations, F_g , F_B et F_D sont positives, mais F_L est comptée positivement quand le glider monte ($\gamma > 0$), et négativement quand il descend ($\gamma < 0$).

Il reste alors à inverser ce système pour déterminer α et U , et ensuite en déduire la vitesse verticale du glider par rapport à l'eau $W_g = U \sin(\gamma)$

L'inversion requiert de paramétrer F_B , F_L et F_D . D'après *Merckelbach et al (2010)*, on peut utiliser pour les gliders de type Slocum la paramétrisation suivante, avec :

$$F_B = g\rho[V_g(1 - \varepsilon p + \alpha_T(T - T_0)) + \Delta V_{bp}](3)$$

$$F_D = \frac{1}{2}\rho S U^2 (C_{D_0} + C_{D_1}\alpha^2)(4)$$

$$F_L = \frac{1}{2}\rho S U^2 a\alpha(5)$$

Des bilans de forces verticaux et horizontaux on peut donc déduire :

$$a\alpha \tan(\theta + \alpha) = C_{D_0} + C_{D_1}\alpha^2(6)$$

$$F_B - F_g - \frac{1}{2}\rho S U^2 [C_{D_0} + C_{D_1}\alpha^2] \frac{\sin^2(\gamma) - \cos^2(\gamma)}{\sin(\gamma)}(7)$$

(6) revient à une équation du second degré en α si on développe la tangente à l'ordre 2 en α ($\alpha \sim 4^\circ \ll \theta \sim 25^\circ$), ce qui permet d'éviter un trop grand temps de calcul. La pratique montre que des deux racines, l'angle d'attaque est celle de plus faible valeur absolue.

(7) permet alors de calculer U facilement.

ρ est la densité de l'eau environnante, p la pression, T/T_0 la température comparée à une température de référence, ΔV_{bp} la variation du volume du glider due au pompage par rapport à une référence, S la surface du glider, V_g le volume du glider, ε sa compressibilité, α_T le coefficient de dilatation thermique, a le coefficient de portance, C_{D0} et C_{DI} les coefficients de traînée.

Les six dernières grandeurs citées sont des coefficients qui peuvent varier lentement dans le temps et qu'il n'est pas toujours possible de connaître à chaque instant. Pour que les valeurs calculées par le modèle ne soient pas biaisées, il est donc nécessaire de recourir à un processus d'optimisation de certains de ces paramètres. Il faut en optimiser suffisamment pour pouvoir correspondre à la réalité. Cependant, il ne faut pas optimiser des paramètres dont les effets ne sont pas indépendants, et ne pas non plus optimiser les paramètres dont l'effet est négligeable. D'après *Merckelbach et al (2010)*, α_T (faible stratification) et C_{DI} ont un effet négligeable sur les calculs et a n'est pas indépendant de C_{D0} et ε . En suivant ces recommandations, j'ai donc optimisé les paramètres C_{D0} , ε et V_g . La fonction de coût minimisée a été le carré de l'écart entre la vitesse déduite des capteurs de pression et celle déduit du modèle de vol, c'est-à-dire qu'on cherche à réduire au minimum le biais sur la vitesse de l'eau de mer W_w .

$$J(\varepsilon, V_g, C_{D0}) = \sum W_w^2 (8)$$

Tous les calculs de vitesses verticales de l'eau, y compris l'optimisation, ont été réalisés sur des séries temporelles interpolées à pas de temps fixe ($\Delta t = 2s$) et lissées par une moyenne glissante entre -40s et +40s, afin d'éliminer le bruit des appareils de mesure, comme suggéré par *Merckelbach et al (2010)*.

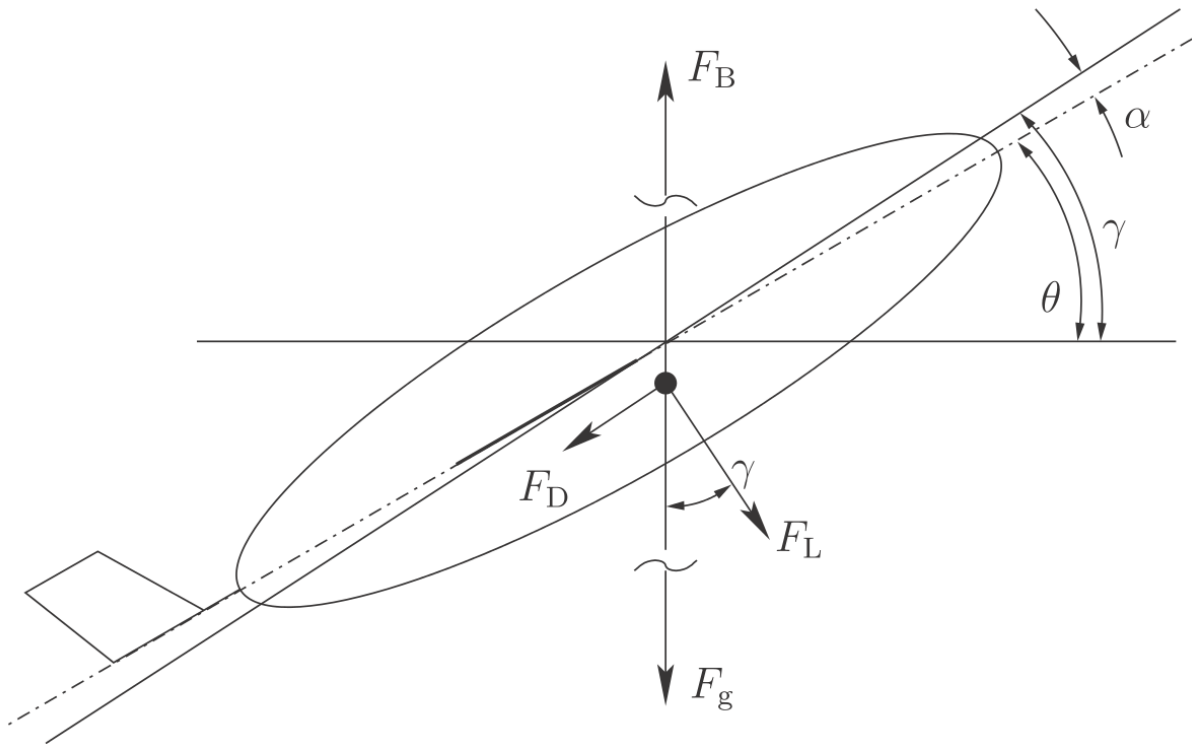


Figure 3 : Schéma des forces et définition des angles d'un glider en vol

Résultats

Chacun des paramètres à optimiser l'a été sur des périodes de temps d'un jour, car l'optimisation des paramètres de vol doit être faite sur une période de temps suffisamment longue pour que les vitesses verticales soit en moyenne nulles. Dans une plume de convection W_w est clairement non nulle, mais leur taille est « petite » ($L \sim 1\text{km}$, traversée en $\sim 1\text{h}$ pour un glider) donc la durée d'une journée répond bien à ce critère. De plus, cette période temporelle ne doit pas être trop longue pour permettre aux paramètres de vol de s'ajuster au cours du déploiement (biofouling, changement du volume pompée, ...). Pour chaque jour une figure a été réalisée montrant l'évolution des différentes grandeurs pertinentes.

La figure 4 montre la fonction de coût et les paramètres optimisés en fonction du temps. Il en ressort que :

- ➔ Certains jours sont mal optimisés, comme en témoigne les 3 pics isolés de la fonction de coût.
- ➔ Le glider est, d'après cette méthode, plus compressible que l'eau. Ce résultat est conforme aux conclusions de *Merckelbach et al (2010)*, et signifie que le glider accélère au cours de sa montée (il se dilate donc la poussée d'Archimède augmente) et au cours de sa descente (il se contracte). Plus précisément, c'est parce que cette tendance à l'accélération a été mesurée sur les vitesses verticales que l'optimisation a abouti à une compressibilité plus grande que celle de l'eau.

➔ Le volume du glider après optimisation augmente brusquement autour du 4 février, ce qui se traduit par une dissymétrie entre la montée et la descente, la première étant plus rapide. Ceci peut s'expliquer par un changement intentionnel dans le fonctionnement de la pompe qui aurait changé la valeur centrale du volume pompé, ou par la présence hypothétique de bulles d'air à l'intérieur du glider.

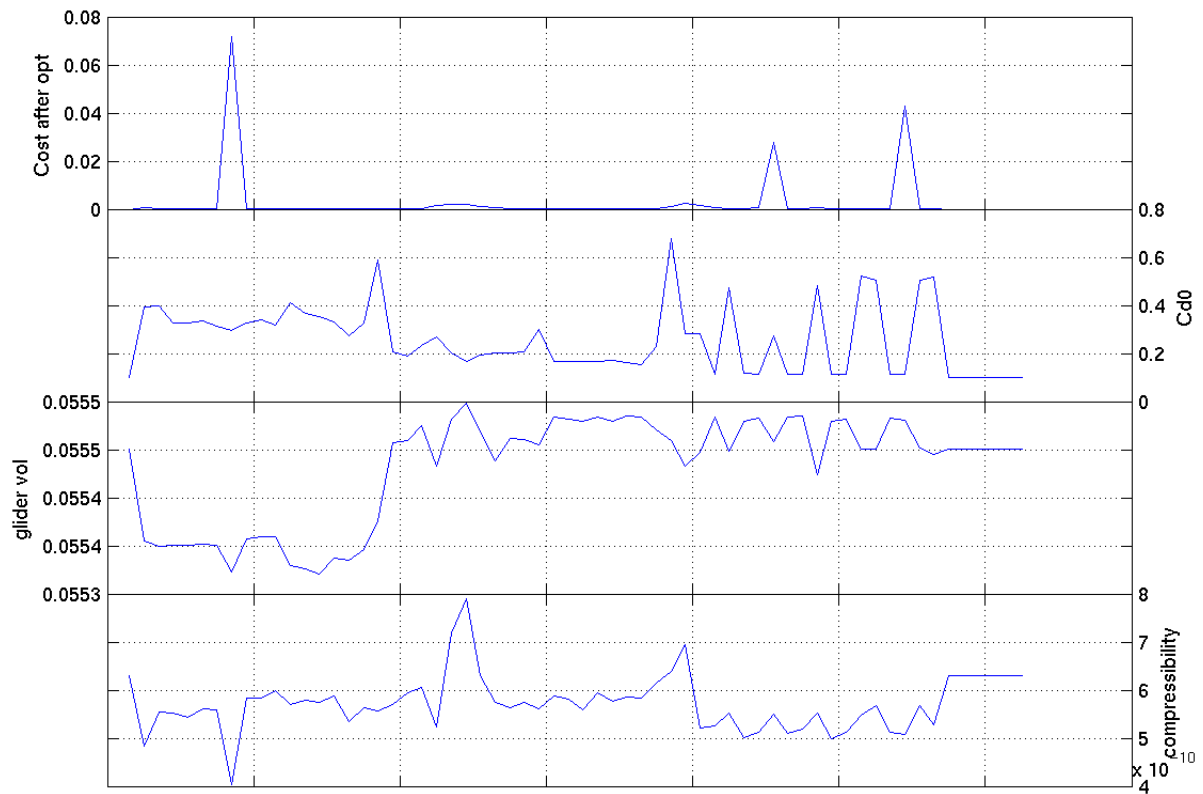


Figure 4 : Fonction de coût et paramètres optimisés en fonction du temps

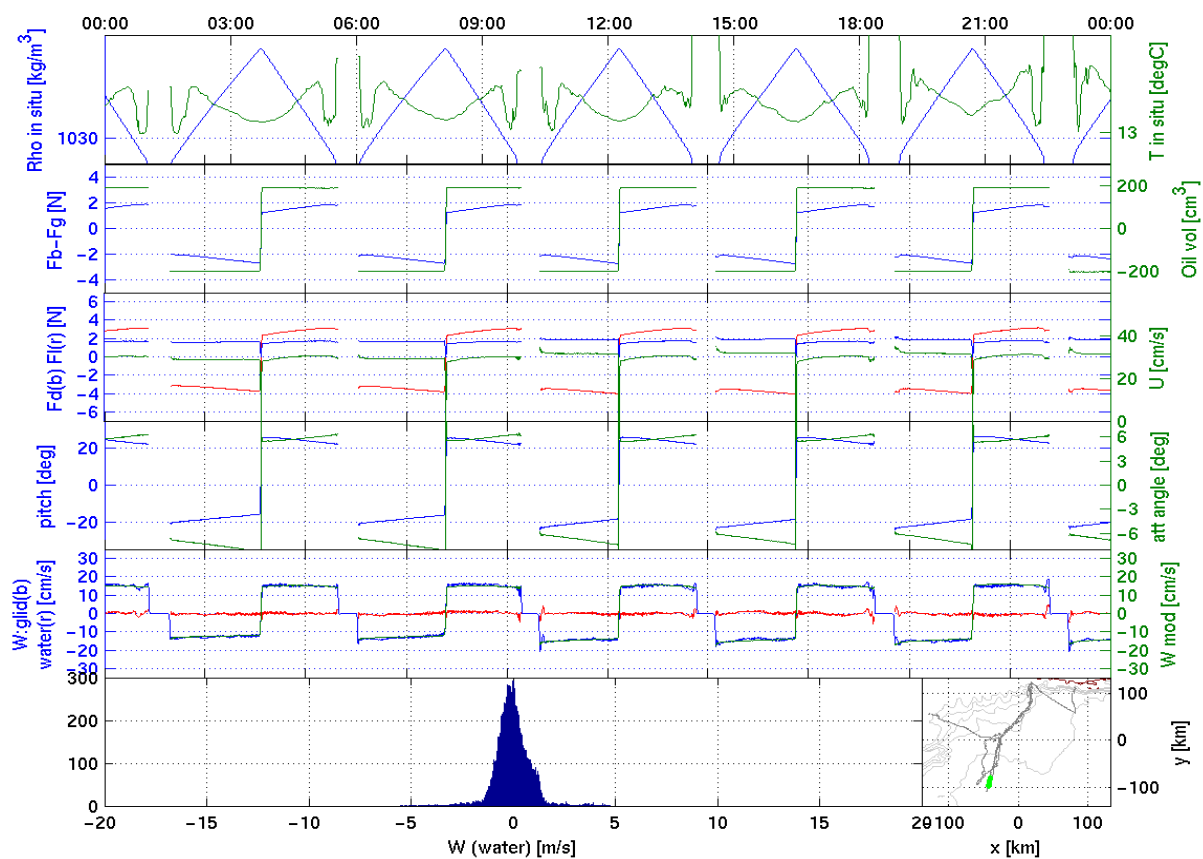


Figure 5.1 : Forces, angles et vitesses pour le 2 février 2013 (période calme)

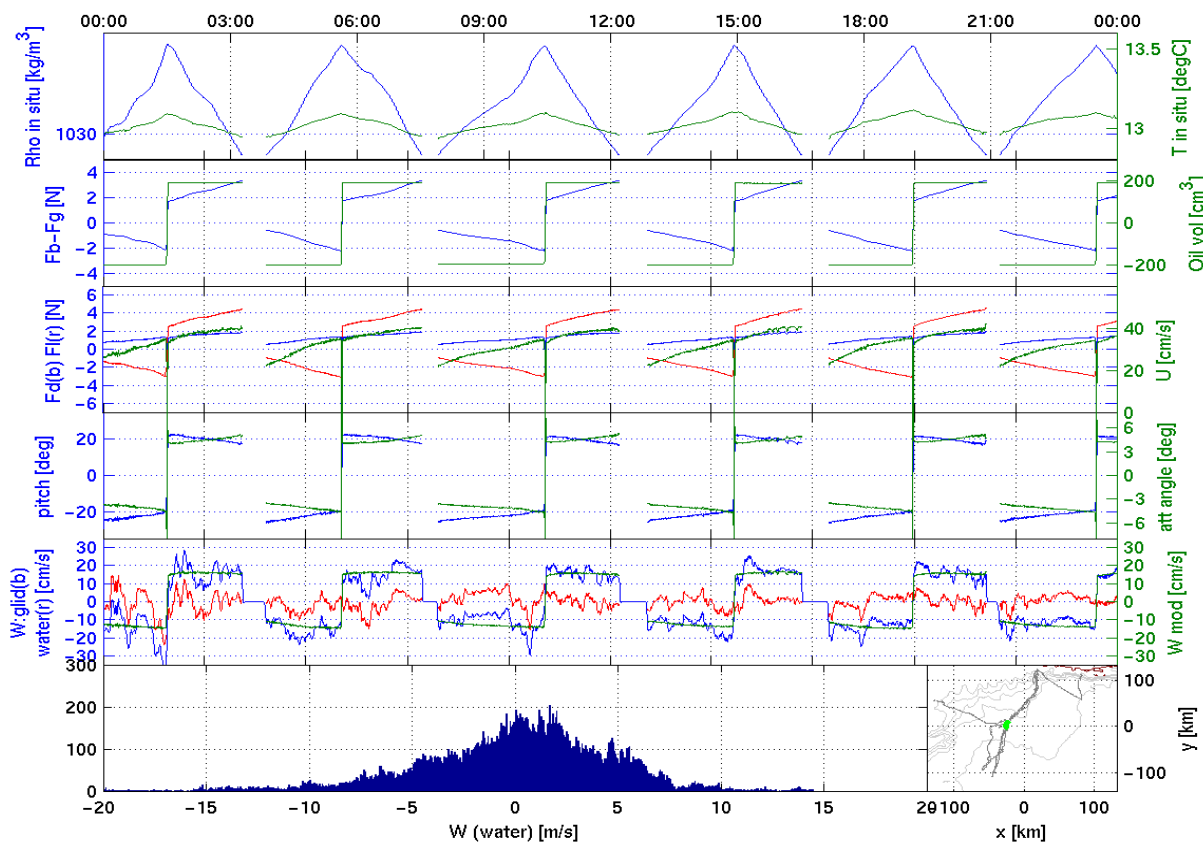


Figure 5.2 : Forces, angles et vitesses pour le 8 février 2013 (convection intense)

Sur la figure 5.2, on constate que :

- ➔ Le glider a effectivement tendance à accélérer sur chaque phase, effet en partie compensé par un pitch qui se rapproche de l'horizontale, de telle sorte que la vitesse verticale varie peu.
- ➔ La montée est plus rapide que la descente.
- ➔ Il ne semble pas y avoir de biais sur la répartition des vitesses verticales de l'eau, qui est approximativement gaussienne.

Ce 9 février a été une journée de convection profonde intense, comme en témoignent les vitesses verticales importantes de l'eau ($\pm 10 \text{ cm.s}^{-1}$). La répartition asymétrique des vitesses verticales (descentes plus rapides) correspondrait bien à la présence de plumes descendantes entourées de mouvements ascendants plus diffus.

La figure 6 montre également le lien de ces ascendances et subsidences avec la température et la salinité environnante. Des trois lignes brisées, celle de gauche représente la température à l'instant t comparée à une température lissée sur une heure, celle de droite la salinité et celle du centre la vitesse verticale de l'eau de mer. En période de convection profonde, une ascendance est corrélée avec la présence d'une eau plus chaude à proximité. La correspondance avec la salinité est plus difficile à établir. En dehors des périodes de convection, ces grandeurs ne sont pas du tout corrélées, et température et salinité dépendent surtout de la profondeur.

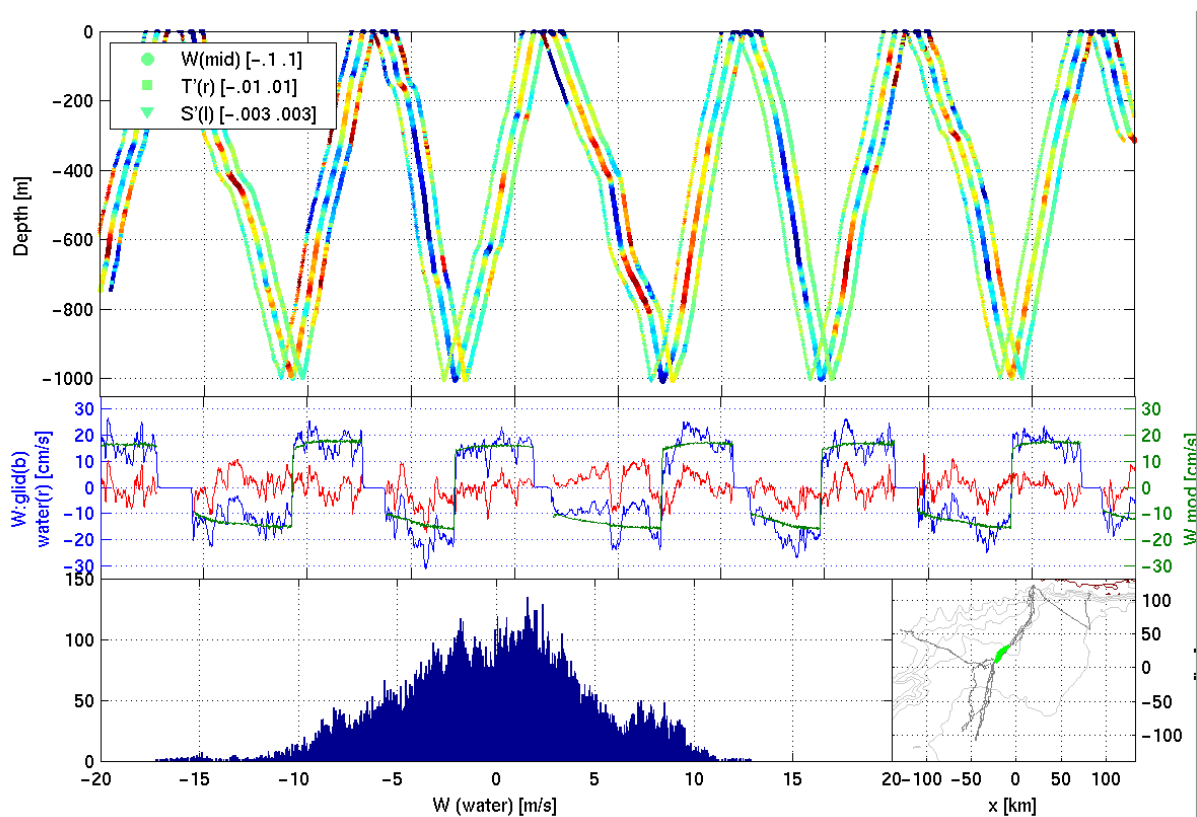


Figure 6 : Vitesse verticale, température et salinité des masses d'eau pour le 9 février

Variantes

Une des difficultés qui reste est de savoir comment un glider peut être plus compressible que l'eau. Pour 2 jours donnés (le 4 février, représenté sur la figure 7 ci-dessous, et le 8 février), j'ai refait les calculs avec une compressibilité fixée à $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, c'est-à-dire un peu en dessous de celle de l'eau de mer (qui est d'environ $5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$), et en optimisant le coefficient de portance a à la place de la compressibilité. Le résultat fait apparaître une vitesse du même ordre à la montée et à la descente, mais aussi un biais. Pour la journée peu agitée du 4 février entre les débuts de montée/descente (où la vitesse est surestimée) et la fin (la vitesse y est sous-estimée), créant deux pics autour de l'origine dans la répartition des vitesses de l'eau. Il est donc plus cohérent dans le calcul de W_w de considérer que le glider est effectivement plus compressible que l'eau.

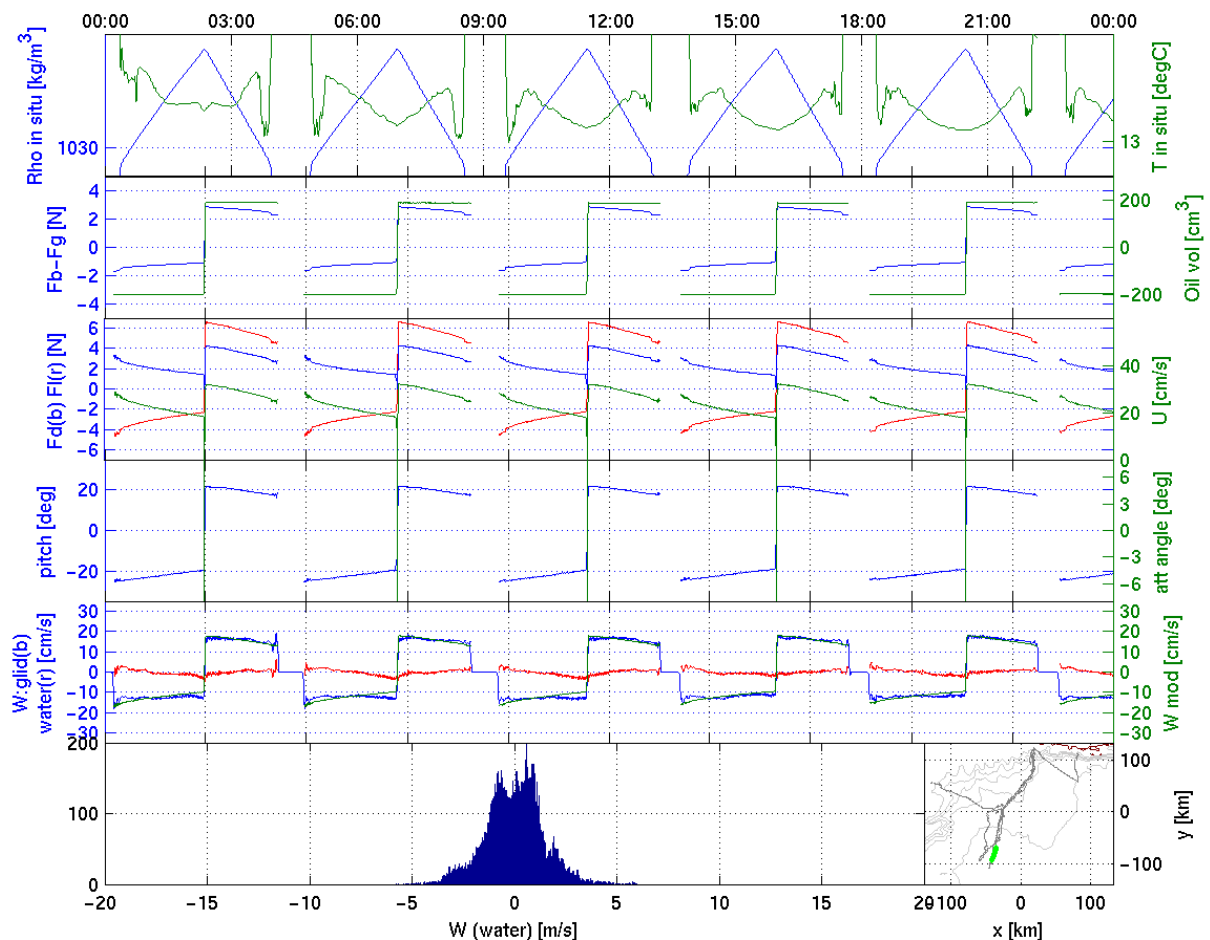


Figure 7 : Forces, angles et vitesses du 4 février pour un glider moins compressible que l'eau

Frakja-Williams et al (2011) propose une autre méthode pour calculer les vitesses verticales à partir des mesures d'un glider de type Seaglider. Cette méthode peut a priori être testée sur les gliders Slocum pour vérifier si elle donne des résultats similaires. Les trois différences principales avec la méthode Slocum sont :

- ➔ La fonction de coût ne fait plus intervenir le carré des vitesses verticales de l'eau, mais leur valeur absolue.
- ➔ La paramétrisation du drag change, C_{D0} étant remplacé par un terme de la forme $bq^{-1/4}$, où q représente la pression dynamique, proportionnelle au carré de la vitesse U .
- ➔ Le paramètre a est optimisé.

Le système formé des équations (1) et (2) est donc plus difficile à inverser. Il faut pour cela passer par une méthode itérative. J'ai pour ma part réutilisé les équations (6) et (7) en remplaçant le coefficient C_{D0} , et je les ai itéré pour recalculer U et a , jusqu'à ce que la distance entre deux pas consécutifs soit suffisamment petite.

La figure 8 représente les données du 8 février analysées par la méthode Seaglider. Elle témoigne d'une compressibilité plus faible que celle de l'eau, mais aussi de possibles erreurs de calcul. Les vitesses verticales et horizontales évoluent selon la même tendance que dans la méthode Slocum. L'angle d'attaque calculé est plus élevé, et à peu près constant. Surtout, la force de flottabilité diminue en valeur absolue au cours de chaque demi-cycle, ce qui pourrait témoigner d'un glider moins compressible que l'eau. Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution car une fois les calculs des vitesses faits, mon script n'arrive pas à recalculer des forces de traînée et de portance cohérentes. De plus, il est difficile d'expliquer dynamiquement comment les résultats obtenus, et notamment l'accélération, peuvent être compatibles avec une flottabilité qui décroît. La forme de l'histogramme est toutefois cohérente avec une activité convective importante.

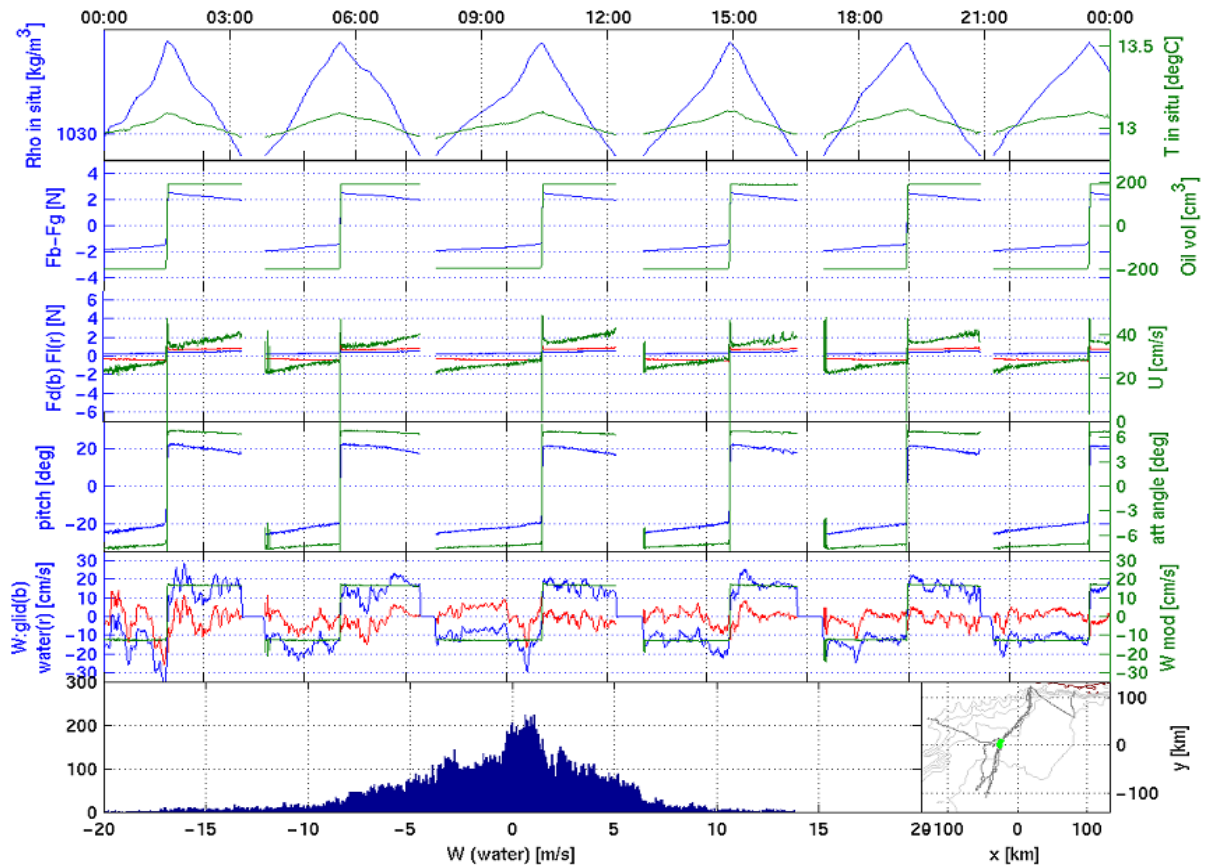


Figure 8 : Forces, angles et vitesses pour ma méthode Seaglider appliquée au 8 février

Conclusion

Pour calculer des vitesses verticales à partir de données fournies par un glider, il est nécessaire de pouvoir les comparer à un modèle de vol, ce qui présuppose une paramétrisation des principales forces et une optimisation des paramètres inconnus. Une paramétrisation unique et exacte n'existant pas, il y a toujours plusieurs possibilités, qui peuvent donner des résultats légèrement différents. Plus les différentes méthodes donnent des résultats proches, plus on peut avoir confiance dans les résultats.

Les méthodes Slocum (*Merckelbach et al., 2010*) et Seaglider (*Frakja-Williams et al., 2011*) donnent des vitesses verticales de l'eau très proches pour les deux jours testés, et ceci malgré des forces de flottabilité aux comportements différents. La méthode Seaglider pourrait être reprécisée et testée sur les autres journées d'enregistrement. La méthode Slocum calcule une vitesse verticale cohérente : sa répartition est à peu près gaussienne pour la grande majorité des jours, il n'y a pas de biais entre la montée et la descente, ni entre le début de chaque demi-cycle et la fin. L'optimisation aboutit à une compressibilité plus grande que celle de l'eau, et à une hausse du volume au début de février.

Cette méthode peut être également testée sur d'autres gliders, ce qui permettra en même temps de se faire une meilleure idée de sa fiabilité.

Références

Merckelbach et al., 2010, « Vertical Water Velocities from Underwater gliders », *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 547-563

Frakja-Williams et al., 2011, « Determining Vertical Water velocities from Seaglider », *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28, 1641-1656