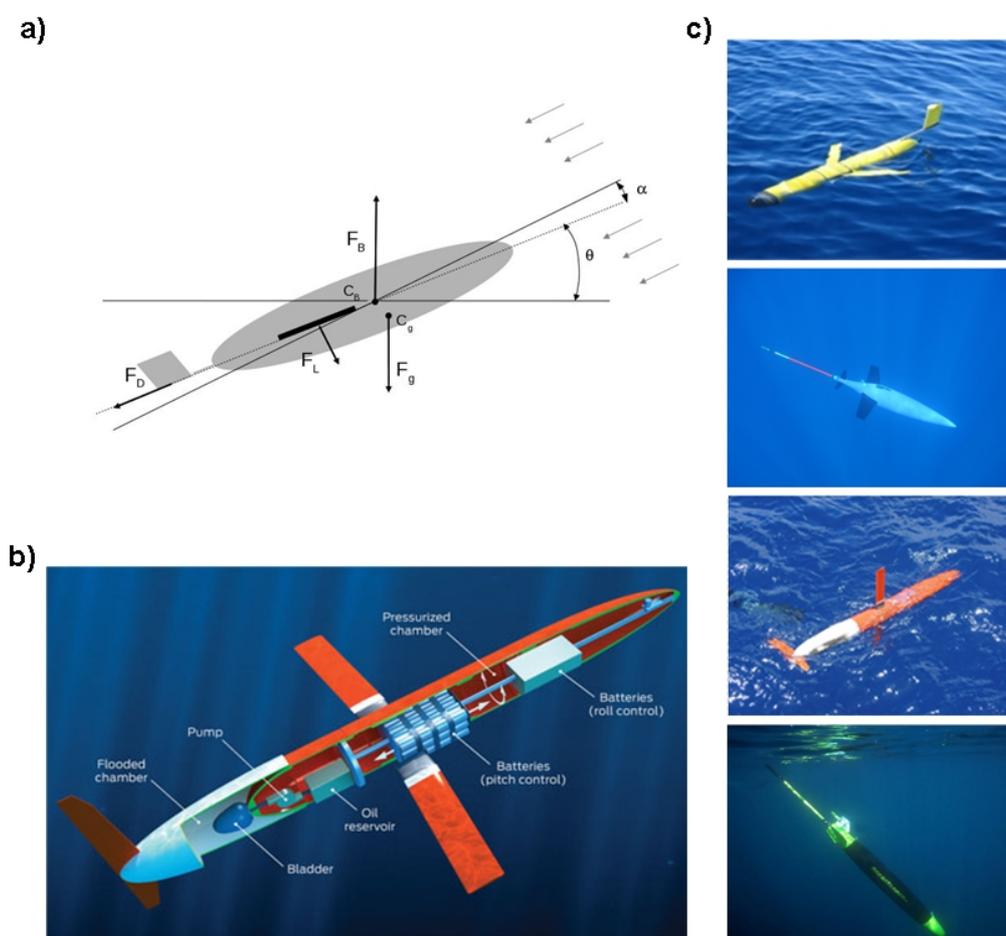


# Présentation des gliders et des défis associés

## 1/ Principe de fonctionnement des gliders

Les gliders (Figure 1) sont des engins sous-marins autonomes de petite taille (50kg, 1.5-2m) réutilisables qui peuvent être déployés (récupérés) à partir de petites embarcations (zodiac) en milieu côtier notamment. Ce sont des engins souples et légers à mettre en œuvre. Ils ont été développés initialement aux Etats-Unis et conçus pour plonger, dans une direction donnée, de la surface des océans jusqu'à une profondeur prédéterminée et ensuite remonter en surface. Les gliders existent pour des applications côtières avec des immersions maximales de l'ordre de 200m ou hauturières avec des immersions qui peuvent atteindre 1000m. Un prototype capable de plonger à 6000 m (ce qui concerne 99 % des océans) a été testé récemment avec succès. Une plongée typique à 1000m dure 3-5h et s'étend sur 2-4km sur l'horizontale. Un sonar leur permet d'éviter le fond.

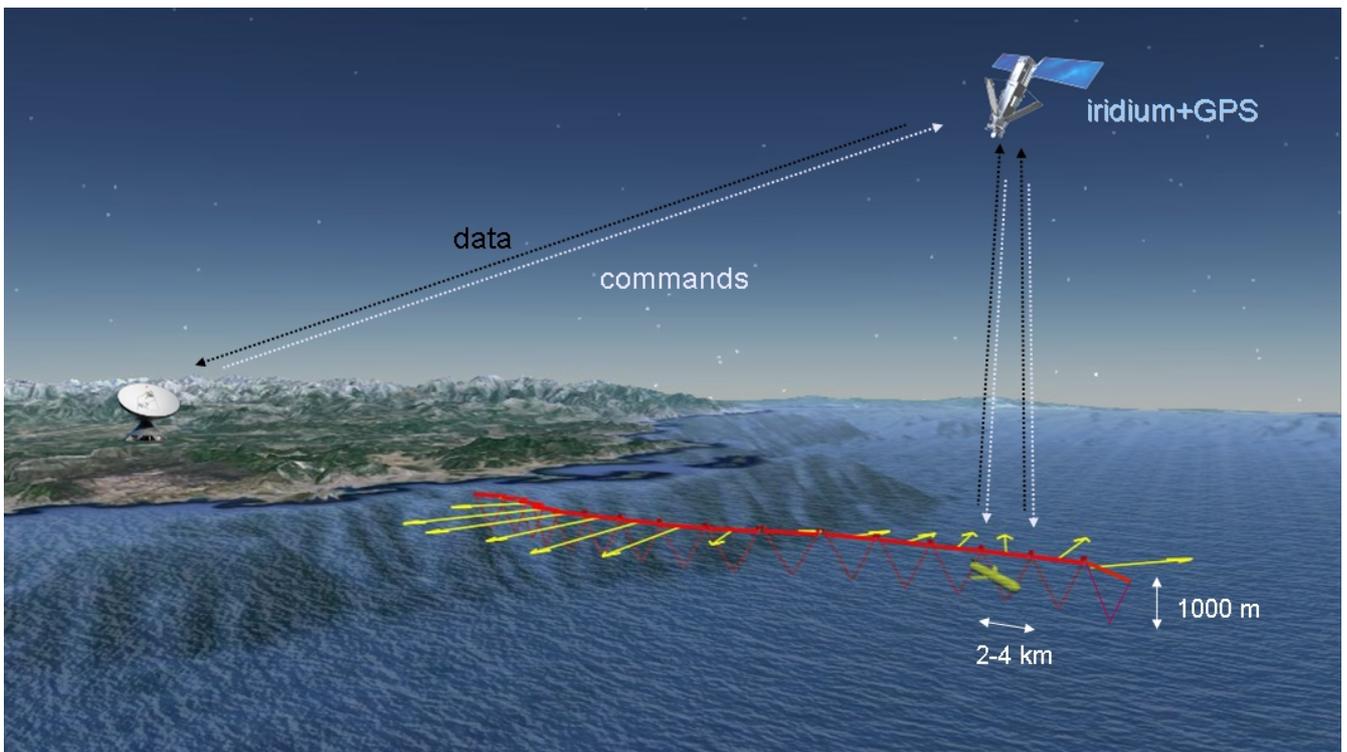
Sans hélice, leur système de propulsion est basé sur un système hydraulique de ballast ( $\pm 250 \text{ cm}^3$  pour un volume total d'environ 50 l). En faisant varier leur flottabilité, ils peuvent se déplacer verticalement avec une vitesse de l'ordre de 10-20 cm/s. Leurs ailes et leurs caractéristiques hydrodynamiques leur permettent de transformer ce mouvement vertical en un mouvement horizontal de l'ordre de 20-40 cm/s.



**Figure1** : (a) Principe de fonctionnement des gliders. Bilan des forces/moments dans un repère lié à la plateforme (poids  $F_g$ ; force d'Archimède  $F_B$ ; portance  $F_L$ ; forces de frottements  $F_D$ ; centre de gravité  $C_g$ ; centre de flottabilité  $C_B$ ; angle d'attaque  $\alpha$ ; angle de plongée/remontée  $\theta$ ). (b) Vue éclatée de l'intérieur d'un planeur sous-marin : pompe hydraulique (ballast) et masses internes mobiles asservies aux angles de tangage et de roulis. (c) Les 4 différents types de gliders disponibles aujourd'hui. De haut en bas : les 3 gliders développés aux USA (Slocum, Seaglider, Spray) et le SeaExplorer qui a été développé récemment en France par Alseamar (groupe ALCEN).

Il suivent des angles de descente/remontée de  $\pm 15-30^\circ$  par rapport à la surface en même temps qu'ils peuvent suivre un cap. Les ailes sont fixes et symétriques et c'est le déplacement de masses internes (batteries) qui leur permet de positionner le centre de gravité par rapport au centre de flottabilité et ainsi de jouer avec la portance des ailes (angles d'attaque  $\sim 2-3^\circ$ ). Une partie des masses internes peut se déplacer dans l'axe du glider pour contrôler l'angle de plongée/remontée (contrôle de l'angle de tangage) et un système de balancier leur permet de contrôler le cap (contrôle du roulis). Ils peuvent ainsi totalement contrôler leurs trajectoires sous l'eau.

Grâce à leur système particulier de propulsion, ils peuvent se déplacer le long de trajectoires en dents de scie à travers l'océan (Fig. 2) et mesurer *in situ* des paramètres océaniques principalement physiques et biogéochimiques. Ils sont classiquement équipés de capteurs de température, de salinité pour des applications en océanographie physique. Ils peuvent aussi être équipés de radiomètres, de capteurs de fluorescence de la chlorophylle a (phytoplancton) ou des substances jaunes (CDOM), de bioluminescence, de nitrates, d'oxygène dissous, de turbidité ou de rétrodiffusion optique (à plusieurs longueurs d'onde pour de la spectrométrie des particules en suspension), pour étudier les cycles biogéochimiques océaniques ou encore de courantomètres Doppler pour mesurer les courants et estimer la quantité de zooplancton. Aujourd'hui, des charges utiles à vocation plus environnementale ou militaire (hydrophones et modems acoustiques, méduses, déchets plastiques, capteurs d'hydrocarbures, détection d'algues toxiques, capteurs optiques de détection de mines) commencent d'être aussi embarquées. Un enjeu majeur actuel est de donner des yeux et des oreilles à ces robots pour compléter la panoplie de capteurs physiques et bio-optiques qui équipent fréquemment les gliders.



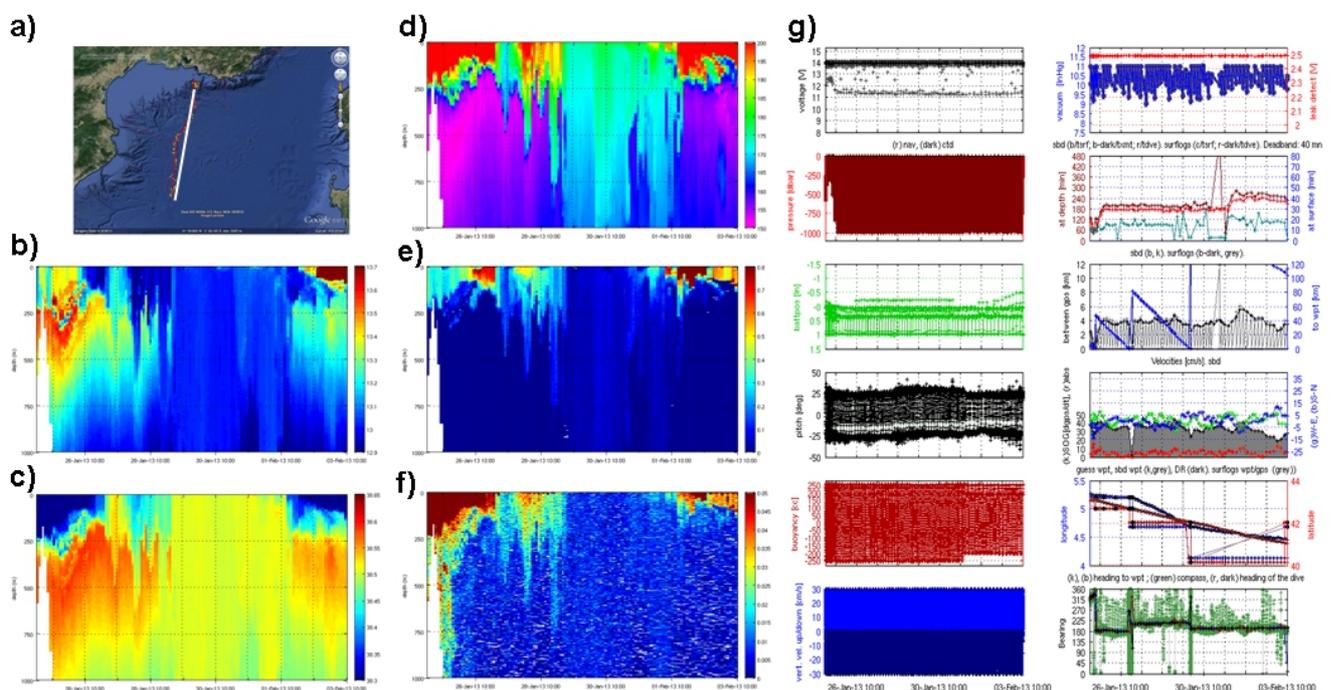
**Figure 2 :** (trait fin rouge) trajectoire d'un glider dans l'océan. (trait gras rouge) trajectoire projetée en surface. (flèches jaunes) estimations du courant océanique moyen entre 2 passages en surface successifs et la profondeur maximale de la plongée. (flèches pointillées noires/blanches) flux montant/descendant de données/instructions. NB : la dimension verticale a été multipliée par 3 pour la topographie et la trajectoire du glider.

A chaque passage en surface le glider compare sa navigation à l'estime sous l'eau, qu'il calcule à partir de ses capteurs d'attitude (pression, tangage, compas), avec des points GPS et calcule une dérive moyenne pendant la plongée. Outre l'intérêt océanographique que ce type de données de courants représente, il peut automatiquement la prendre en compte pour ajuster son cap pour la plongée d'après, afin d'effectuer une trajectoire plus rectiligne vers le point préprogrammé qu'il doit rejoindre (waypoint). Les gliders ont pu devenir une réalité opérationnelle avec l'avènement de la

téléphonie à couverture globale par satellite qui a changé la donne. Le système de communication bidirectionnelle par satellite Iridium permet aux gliders non seulement de transmettre leurs mesures à chaque remontée en surface en temps quasi-réel partout dans le monde, mais aussi de recevoir des instructions de cap, d'angle de descente/remontée, de vitesse verticale etc... si bien qu'on peut littéralement les piloter à distance. Leurs missions sont préprogrammées mais des impératifs opérationnels ou scientifiques peuvent amener à les modifier en cours de route.

Leur système de propulsion est peu gourmand en énergie (consommation moyenne : ~2 W) et leur donne une autonomie de ~2-6 mois suivant la charge utile embarquée et les courants rencontrés (le record mondial étant une mission de 11 mois). Etant capables de remonter la plupart des courants océaniques (intenses surtout en surface), ils peuvent effectuer des mesures sur plusieurs milliers de kilomètres le long de sections au travers de l'océan (des gliders ont déjà traversé l'Atlantique : ~6000km en ~7 mois) ou encore être utilisés en mode "mouillage virtuel" pendant de longues périodes de temps au sein d'une même zone d'extension réduite. On peut les piloter à distance pour concentrer les mesures là où on veut, en fonction des objectifs.

Les gliders permettent de réaliser un très bon échantillonnage pour une section verticale. La Figure 3 montre un exemple d'une section réalisée par un glider en hiver en Méditerranée nord-occidentale. C'est une zone particulière où, sous l'action du Mistral et de la Tramontane, des eaux de surface préconditionnées se densifient (refroidissement et évaporation) jusqu'à devenir aussi lourdes que celles situées dessous. Cela provoque alors des phénomènes de convection et de mélange vertical qui peuvent ventiler jusqu'aux eaux profondes (2500m de profondeur). Ce phénomène se produit en hiver alors que les conditions météorologiques sont très mauvaises et qu'il est impossible d'aller l'observer à partir de navires. Les gliders ne sont pas perturbés par l'état de la mer et celui-ci montre pour la première fois ce phénomène de ventilation en phase active à l'échelle du bassin. Sur la Figure 3 on peut distinguer la zone ventilée au centre de la périphérie stratifiée sur tous les paramètres mesurés par le glider.



**Figure 3 :** Exemples de données collectées par un glider déployé en Méditerranée nord occidentale le long d'une section (0-1000m sur la verticale ; 250km de long, du nord au sud) réalisée en ~10 jours. (a) trajectoire, (b) température potentielle, (c) salinité, (d) oxygène dissous, (e) fluorescence de la Chlorophylle a, (f) turbidité et (g) 12 graphes de « santé » qui permettent de visualiser les principaux (~30) paramètres de vol et techniques de l'appareil qu'il faut surveiller pour s'assurer du bon déroulement d'une mission. Disponibles en temps réel sur <http://www.ego-network.org>.

Il faut noter le caractère nouveau et la densité exceptionnelle des observations à partir de gliders avec lesquelles on gagne un ordre de grandeur en terme de profils 'verticaux' (les pentes des variables océaniques sont d'un ordre de grandeur plus petites que les angles de plongée/remontée

des gliders et leurs mesures peuvent être considérées comme quasi-verticales) par rapport aux autres plate-formes de mesures. Sur la section présentée en Figure 3, on peut distinguer des détails typiques de petits tourbillons et de filaments de quelques kilomètres d'extension horizontale que l'on n'arrivait pas à résoudre avant.

Une section de ce type peut être répétée par un glider jusqu'à épuisement de ses batteries puis continuée en effectuant des rotations avec d'autres appareils pour un suivi en continu de la colonne d'eau tout au long de l'année. Ces mesures sur le long terme, mises en œuvre notamment depuis 2009 dans le cadre du service d'observation MOOSE (<http://www.moose-network.org>) auquel Pierre Testor a largement contribué, constituent aussi un aspect nouveau par rapport aux autres techniques d'observation *in situ*. Leur relativement faible coût et leur caractère automatisé les désignent comme particulièrement adaptés aux réseaux de mesures opérationnels nécessaires aux systèmes de prévision des circulations aux échelles régionales et côtières.

Les gliders peuvent prendre aussi tout leur intérêt dans une utilisation en flottille. Déployés en nombre autour d'un même objectif (front océanique, tourbillon,...), ils peuvent alors fournir une description 3D de l'intérieur de l'océan dans le cadre d'études de processus qui n'a jamais été accessible auparavant.

Les gliders peuvent être considérés comme une technologie de rupture. Ils peuvent permettre un saut significatif en termes de couvertures spatiale et temporelle du milieu océanique par rapport aux techniques classiques (campagnes océanographiques, satellites, mouillages, flotteurs lagrangiens) tout en étant complémentaires, mais la prise en main de cette technologie demande de relever un certain nombre de défis.

## 2/ Défis technologiques et solutions adoptées

Pour mettre en œuvre des gliders, il faut pouvoir disposer d'un atelier dédié et suivre des protocoles stricts quant à la préparation qui est délicate. Les changements de flottabilité des gliders sont relativement limités ( $\pm 250\text{cm}^3$ ) mais leur permettent de surmonter la variabilité du milieu océanique s'ils ont des masses qui leur permettent d'être neutres d'un point de vue flottabilité dans de l'eau ayant une densité et une température moyennes caractéristiques des eaux dans lesquelles ils vont évoluer. Chaque changement des batteries ou de capteur/périphérique peut induire des modifications significatives sur la masse totale et la répartition des masses à l'intérieur. Quelques grammes de différence demandent de repeser et de rééquilibrer l'appareil. Cela nécessite un atelier et se fait en bassin dans une eau à la densité connue avec précision ( $\sim 0.01\text{ g/m}^3$ ), des abaques permettant de se positionner par rapport aux eaux ciblées. Il faut peser l'appareil avec précision (quelques grammes sur 50kg) et tester les couples de rappel en tangage et roulis dans l'eau. Il faut arriver à positionner le centre de gravité à 4-6mm sous le centre de flottabilité de façon à ce que les capacités de vol du glider soient nominales.

En plus de cet atelier et de moyens à la mer, il est nécessaire de disposer d'un réseau informatique pour les communications. Il est en effet indispensable de gérer correctement le flux bidirectionnel (données/commandes) et d'effectuer le traitement des données gliders le plus rapidement possible pour pouvoir les piloter en toute connaissance de cause. Un glider faisant surface toutes les  $\sim 2-5\text{h}$ , cela constitue une forte contrainte, d'autant plus forte que les surfacages peuvent être dans certains cas beaucoup plus fréquents. Le pilotage d'un glider reste une opération délicate. Sa vitesse propre étant parfois de même ordre que celle des courants océaniques, sa dérive peut être importante et il faut pouvoir réagir rapidement pour louvoyer. D'autre part, en plus de la bonne acquisition des données scientifiques, il faut surveiller une certaine quantité de paramètres de vol (trajectoire, capteurs d'attitude) et techniques (moteurs, niveau des batteries, pression interne,...) pour s'assurer du bon déroulement de la mission d'un glider (Fig. 3). Si les logiciels embarqués à bord des gliders, qui sont tous organisés en couches de comportements, font déjà un certain nombre de contrôles automatiques sur les  $\sim 1000$  variables de comportement nécessaires, leur intelligence reste relativement limitée (les contraintes de place et de consommation d'énergie interdisent d'installer un ordinateur très performant à bord). L'utilisateur peut éviter de nombreux problèmes (allant jusqu'à la perte d'un appareil qui pourrait être drossé à la côte par exemple) en restant vigilant sur des paramètres-clés, en estimant des tendances et des quantités intégrées et en réagissant rapidement pour modifier la mission du

glider le cas échéant. Les principales difficultés résident dans l'acquisition d'une expertise et dans le fait qu'il faut arriver à assurer ce pilotage quasiment 24h/24 et 7j/7 tout au long de l'année.

Pierre Testor a été parmi les premiers à tester ces appareils hors du cadre strict de courte démonstration technologique de concept. Il a pu ainsi participer au développement de ces plateformes sortant juste du stade prototype et nécessitant de nombreuses mises au point pour leur mise en œuvre dans un contexte océanographique. Dès ses premières expériences glider, il a pris en charge tous les aspects de la mise en œuvre de ces appareils (du ballastage au pilotage en passant par les opérations en mer et la gestion du flux bidirectionnel des données) et a commencé à développer toute la partie aval, à la fois organisationnelle, technologique et scientifique.

Après son recrutement au CNRS en 2006, Pierre Testor a entrepris de développer l'activité glider au niveau national. Avec ses collègues intéressés par cette technologie et ses applications et le soutien du CNRS et de l'IFREMER, il a pu mettre en place un parc national regroupant quasiment tous les gliders français (15) financés sur projets (propriétés du CNRS, de la DGA, de l'IFREMER, de l'IRD et de l'UPMC) et une cellule « glider » à la DT-INSU et au CETSM à la Seyne/m en 2009 pour leur mise en œuvre dans le cadre d'un appel d'offres national. Il a formé cette équipe d'ingénieurs d'environ 4 ETP et pu mettre en place avec eux une infrastructure optimisée capable d'assurer une activité glider soutenue en interaction avec les laboratoires intéressés.

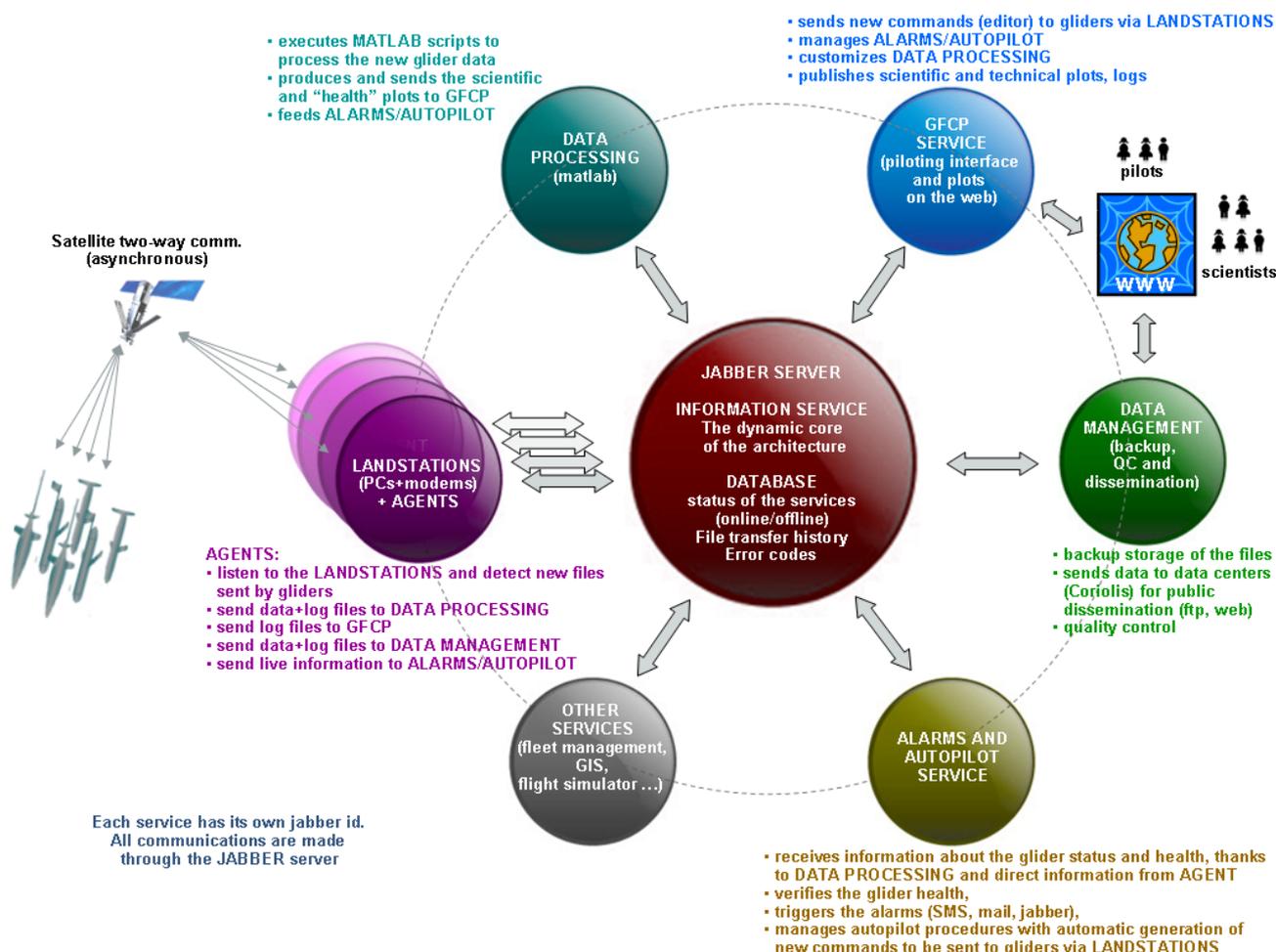
Au niveau de la préparation des appareils, il a contribué à définir les protocoles et les procédures. Des batteries de tests matériels et logiciels (en plus de l'équilibrage, chaque moteur/périphérique doit être testé) préliminaires aux déploiements permettent de s'assurer du bon fonctionnement des gliders avant leurs missions en mer. Dans ce cadre, il a participé à la mise en place d'une base de données de maintenance qui est utilisée aujourd'hui par l'équipe d'ingénieurs de la cellule « glider », pour effectuer le suivi des pièces/capteurs de chaque appareil ainsi que de toutes les opérations techniques effectuées, ce qui permet une gestion efficace d'un parc de nombreux instruments constitué de nombreuses pièces.

Les interfaces de pilotage fournis par les constructeurs sont très succinctes et sont vite dépassées dès lors qu'il s'agit de piloter plusieurs gliders en même temps ou sur le long terme. Pour gérer les communications Iridium, elles demandent des interventions fréquentes d'opérateurs à terre. Pour pouvoir assurer le suivi sur le long terme de ses premiers gliders, Pierre Testor a codé entièrement les parties de traitement des données, de visualisation sur le web et d'envoi en temps réel dans les bases de données opérationnelles pour leur utilisation par les modèles numériques d'analyse et de prévision océanique, ainsi que l'automatisation de ces services. Depuis, avec l'aide de la cellule « glider », Pierre Testor a pris en main la gestion de ces communications bidirectionnelles dans un cadre plus général et dans une optique de gestion de flotte hétérogène de gliders, asynchrones dans leurs surfacages, opérant de conserve.

Il y a en effet nécessité de mettre en place tout un environnement en aval des logiciels fournis par les constructeurs qui ne permettent qu'une gestion de bas niveau pour un seul glider à la fois. Cet environnement se décline en termes d'outils d'aide au pilotage, de traitement des données, de visualisation scientifique et technique, d'intelligence artificielle, de travail collaboratif, de contrôle qualité, de dissémination, etc... C'est dans cet environnement en aval des plateformes que réside aujourd'hui l'innovation et la valeur ajoutée. Pierre Testor a orchestré le développement et la mise en place d'un système basé sur une architecture informatique clients-serveurs distribuée (Fig. 4), d'outils de dialogues entre ces machines et de procédures/alarmes automatiques. La conception de cette architecture tient compte des capacités des machines actuelles et répartit les charges de travail pour une livraison opérationnelle des services nécessaires. Le protocole jabber (messagerie instantanée) est utilisé pour la gestion des flux de données et faire communiquer toutes les machines impliquées.

Les stations de communication avec les gliders à terre (LANDSTATIONS) sont fournies par les constructeurs. Ils se contentent de fournir des machines capables de gérer les commandes « bas niveau » des gliders, c'est-à-dire le transfert de fichiers de données et de configuration de mission (édités à la main) entre un glider et sa station à terre. Des agents ont été développés pour être installés sur ces machines, pour les superviser et les intégrer dans le segment sol via le serveur JABBER qui est à l'écoute des signaux des différentes machines du système. Celui-ci est le cœur de l'architecture, déclenche les différentes actions des services et gère les transferts de fichiers entre eux. Cette architecture de gestion d'une flotte d'appareils accueille aussi d'autres services pour faciliter la bonne conduite des expériences glider :

- Un service de rapatriement journalier de données satellites (hauteur dynamique de la mer, température de surface, couleur de l'océan), d'autres données in-situ (de flotteurs, de navires...) et de sorties de modèles numériques d'analyse et de prévision océaniques (dans lesquels les données de gliders sont assimilées). Celles-ci sont utilisées par la machine de traitement des données pour une visualisation intégrée permettant de pouvoir piloter des flottes d'appareils dans un contexte horizontal et de cibler certains écoulements (fronts océaniques, tourbillons,...).
- Les prévisions numériques qui donnent en 3D des estimations de l'ensemble des variables (vitesse, température et salinité) sur un grille de l'ordre de quelques kilomètres permettent de faire tourner un simulateur de vol de gliders. Celui-ci prend en compte l'équilibre quasi-statique du glider, son algorithme propre de pilotage et sa dérive par les courants simulés et peut prédire ainsi les trajectoires des appareils sur plusieurs jours dans une perspective de planification au jour le jour de missions complexes et multi-engins.
- Un service de pilotage automatique de flotte coordonnée 1) en formation dans un contexte « maître-esclaves » et de contrainte géométrique ou encore 2) dans un contexte d'échantillonnage adaptatif, c'est à dire en fonction de données envoyées par les gliders eux-mêmes (on peut par exemple avec un minimum de 3 appareils remonter le gradient de la température moyenne entre 200 et 300m) ou externes (télé-détection, modèles). Ce service gère les surfacages asynchrones des gliders et génère des instructions de cap et de vitesse de manière automatique pour plusieurs gliders à la fois.



**Figure 4 :** schéma fonctionnel de l'architecture informatique du segment sol, alimenté par la base de données de maintenance pour les méta-données