



**Interreg**



UNIONE EUROPEA

**SICOMAR**  
**plus**

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

---



Prodotto - Livrable T2.2.1:

Rapporto metodologico sull'uso dei  
veicoli autonomi per il monitoraggio  
ambientale/Rapport méthodologique sur  
l'utilisation des véhicules autonomes pour la  
surveillance environnementale

Data prevista - Date prévue : 31/12/21

Data di consegna - Date d'échéance : 31/01/22

Versione - Version : V5.0



<b>Informazioni generali sul documento / Informations générales sur le document</b>	
<b>Componente / Composante</b>	T.2
<b>Attività/Activité</b>	A2.2
<b>Prodotto/Livrabile</b>	T2.2.1
<b>Nome Documento / Nom Document</b>	<p>“Prodotto T2.2.1: Rapporto metodologico sull'uso dei veicoli autonomi per il monitoraggio ambientale”</p> <p>“Livrabile T2.2.1 : Rapport méthodologique sur l'utilisation des véhicules autonomes pour la surveillance environnementale”</p>
<b>ID File/ID Fichier</b>	SICOMAR PLUS_T2.2.1.pdf

<b>Processo di approvazione / Procédure d'approbation</b>	<b>Nome/Nom</b>	<b>Ente/Établissement</b>	<b>Data/Date</b>	<b>Visto/Vu</b>
<b>Coordinatore/ Coordinateur</b>	Gilda Ruberti	Regione Toscana		
<b>CP Leader/ CP Leader</b>	Gilda Ruberti	Regione Toscana		

<b>Processo di revisione / Procédure de révision</b>	<b>Autore/Auteur</b>	<b>Data Rev./ Date Rév.</b>	<b>Modifiche/Modifications</b>
V5.0	Coudray S. <sup>1</sup> ,	31/01/22	



	<p>Brandini C.<sup>2</sup>, Taddei S.<sup>2</sup> , Doronzo B.<sup>2</sup> , Lapucci C.<sup>2</sup></p> <p><sup>1</sup> IFREMER La Seyne Sur Mer (France) <sup>2</sup> LAMMA/Firenze e Livorno (Italia)</p>		

Travail réalisé dans le cadre du projet SICOMARPLUS,  
financé par le Programme de coopération  
Italie-France Maritime 2014-2020

## **SICOMARPLUS Attività T2.2.1**

# Rapporto metodologico sull'uso dei veicoli autonomi per il monitoraggio ambientale

**VERSIONE FINALE 5.0 del 31/01/2022**

**Coudray S.<sup>1</sup>, Brandini C.<sup>2</sup>, Taddei S.<sup>2</sup>, Doronzo B.<sup>2</sup>, Lapucci C.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>**IFREMER La Seyne Sur Mer (France)**

<sup>2</sup>**LAMMA Firenze e Livorno (Italia)**

page bianca

# INDICE

## Introduzione

### 1. Breve storia dello sviluppo dei veicoli sottomarini autonomi

### 2. Automazione degli interventi sottomarini e di superficie

### 3. Elenco (non-esaustivo) dei veicoli autonomi operativi esistenti in Europa

#### 3.1 Robot sottomarini operativi

ROV semi-autonomi

AUV interamente autonomi

Mini-robots sottomarini

#### 3.2 Robot di superficie operativi

Il Waveglider di Liquid-Robotics (LAMMA-IFREMER)

Il veliero autonomo VAIMOS (IFREMER-ENSTA)

Il drone per prelievi SPEEDO (IFREMER)

#### 3.3 Alcuni veicoli sperimentali nel mondo

#### 3.4 Sciame di droni

#### 3.5 Boe di misura mobili autonome

### 4. Cooperazione transfrontaliera per l'acquisto di un Waveglider

### 5. Prospettive d'uso dei robot autonomi : quadro metodologico

#### 5.1 Dispiegamento operativo del sistema Waveglider

Dispiegamento proprietario

Dispiegamento con servizio fornitore

#### 5.2 Le sfide del mantenimento di un sistema marino autonomo

Logistica utile

Competenze da sviluppare e mantenere sul lungo termine

Usura e manutenzione « di routine »

Invecchiamento tecnologico e aggiornamenti

Calibrazioni

Specificità di mantenimento proprie al Waveglider

### 6. La gestione delle misure scientifiche

Acquisizione

Pre-trattamento dei dati

Internal storage

Diffusione delle informazioni in tempo reale

Display delle informazioni diffuse

Archivio lungo termine dei dati a terra

## **7. Sviluppi tecnologici in corso**

**7.1 Nuovo sensore HAP con bi-fluorimetria (Università di Tolone-ALSEAMAR)**

**7.2 Contratto di studio SICOMARPLUS per fluorimetria su mini-robot**

**7.3 Sviluppi futuri a corto termine**

## **8. Reti e piattaforme disponibili in caso d'incidente transfrontaliero**

**8.1 Quadro normativo**

**8.2 Sistemi disponibili nel 2020**

## **Conclusione**

## **Annessi**

## Introduzione

L'attività 2 del progetto INTERREGV-MARITTIMO SICOMARPLUS è dedicata all'integrazione e all'implementazione di sistemi di monitoraggio ambientale basati su piattaforme mobili.

La zona marittima di cooperazione del progetto corrisponde approssivamente al Santuario Pelagos, principale Area Specificamente Protetta dello spazio Mediterraneo (ASPIM), caratterizzata da un importante patrimonio naturale e sottoposta ad una forte pressione antropica. Il progetto SICOMARPLUS punta in particolare notament al miglioramento della sicurezza della navigazione nello spazio marittimo transfrontaliero, fortemente minacciato in questi ultimi anni dall'aumento del traffico merci, soprattutto delle merci pericolose, e del numero di passeggeri che attraversano il Mediterraneo per motivi di occupazione e di turismo nautico o crociere. Ridurre i rischi significa migliorare i sistemi di previsione (meteo, modelli di circolazione), rendere permanente i sistemi di monitoraggio (radari HF, sistemi di sicurezza in mare) e migliorare la formazione delle persone che lavorano nelle zone marittime pericolose.

L'uso di piattaforme mobili di misurazione è un elemento importante del sistema di monitoraggio sia per ottenere una buona conoscenza dello stato di riferimento nei settori a rischio, sia per fornire informazioni pertinenti in caso di incidenti gravi che possono provocare un inquinamento del litorale la cui ubicazione e portata non possono essere determinate in anticipo.

In questo contesto, cercheremo in un primo tempo di individuare i vari sistemi di misurazione autonomi attualmente sviluppati nel mondo e più particolarmente disponibili in Europa e nel Mar Mediterraneo nel 2020. Mentre la seconda parte del documento si concentrerà in particolare sul veicolo Waveglider e sugli aspetti metodologici relativi a questo strumento nonché a sistemi complementari di tipo mini-robot in fase di espansione per il prossimo decennio.

# 1. Breve storia dello sviluppo dei veicoli sottomarini autonomi

Il primo robot sottomarino autonomo al mondo fu lo SPURV, sviluppato nel 1957 dall'Università di Washington per conto della marina americana a scopo di studiare le trasmissioni acustiche in mare. Dieci anni più tardi, IFREMER ha sviluppato il primo robot civile operativo profondo di osservazione che si chiamava «l'Epaulard», operativo dal 1980 al 1990: guidato da comandi acustici su un campo di balise geolocalizzate, permetteva di effettuare misurazioni idrologiche (temperatura e salinità) e di realizzare fotografie ad alta risoluzione nonché rilevazioni batimetriche fino a 6000 metri di profondità.

Nel periodo seguente 1990-2010, una nuova generazione di piccoli sottomarini fu messa in servizio da più paesi nel mondo per l'esplorazione visuale delle grandi profondità con 2 o 3 persone a bordo, poi rapidamente completata da ROV pesanti, tele-operati dalla superficie. Tutti disponevano di capacità di misurazione idrologica e di osservazione mediante telecamere con registratori digitali. Alcuni di questi robot sono ancora operativi<sup>1</sup>.

Sin dagli anni 1995-2005, nuovi veicoli totalmente autonomi e programmabili (AUV) furono sviluppati per effettuare missioni civili esplorative, principalmente costiere fino a una profondità di 2000-3000 metri. Oggi, progetti di AUV 6000 metri sono allo studio o già disponibili per l'uso in Norvegia (Kongsberg HuginSuperior), in Francia (Ifremer-ECA Coral), negli Stati Uniti (Teledyne-Gavia Raptor, REMUS6000), in Giappone (JAMSTEC Urashima-REMUS) etc.

Dal 2010, veicoli misti (a volte tele-operati e autonomi) cominciarono a vedere la luce. Si tratta di robot che possono essere successivamente telecomandate per raggiungere un luogo profondo e poi liberate dal loro collegamento per funzionare come un AUV su cantieri di dimensioni ridotte. Il primo fu il NEREUS del Woods Hole Institution-USA (2006-2014) che tuffò più volte nella Fossa delle Marianne nel Pacifico prima di implodere per sbaglio. Altri veicoli di questo tipo furono poi studiati per profondità intermedie 1500 e 3000 metri: progetto HROV-Arch 2011-2013 dell'Università di Bremen in Germania, HROV Icefin dell'Università di Georgia-USA 2014 concepito per il monitoraggio del continente Antartico, HROV Ariane di IFREMER, operativo sin dal 2015 e principalmente utilizzato per l'esplorazione dei Canyon sottomarini nel Mediterraneo.

In parallelo a questi veicoli dotati da una propulsione elettrica, l'uso dei Gliders, muovendosi modificando la galleggiabilità e spostando una massa interna, si è generalizzato per la sorveglianza di radiali costiere. Al margine dei Gliders classici, l'invenzione da parte di Liquid-Robotics (USA) del Waveglider, confinato in superficie con una propulsione meccanica consentirà di sviluppare il concetto di «missione autonoma di lunghissima durata»

<sup>1</sup>

[https://wwz.ifremer.fr/grands\\_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-robots/Robots-dans-le-monde](https://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-robots/Robots-dans-le-monde)



Nel 2020 la flotta mondiale dei veicoli marini autonomi continua a diversificarsi con lo sviluppo di AUV civili operativi molto profondi fino a 6000 metri e la messa in servizio sperimentale di robot di superficie di tutte le dimensioni (ASV) che cominciano ora ad essere utilizzati in collaborazione con droni aerei e in flottiglie autonome (progetti ancora sperimentali).

## **2. Automazione degli interventi sottomarini e di superficie**

Per le operazioni subacquee ad ampia scala è sempre stato necessario, fino ad un periodo recente, di essere fisicamente presente in mare per assicurare lo spiegamento e il controllo permanente delle macchine che effettuano lavori in modo remoto con ombelicale o in modo semi-autonomo, spesso con una logistica piuttosto pesante sistemata su una nave di superficie.

Sin dalla comparsa sul mercato dei gliders passivi nel 2000, la presenza dell'uomo in mare ha potuto essere ridotta alle operazioni di messa a mare e di recupero dell'attrezzo mediante imbarcazioni leggere. Ciò riguarda in generale solo semplici missioni di sorvolo di circa un mese per i Gliders classici che operano fra i 100 e i 600 metri.

Per effettuare misurazioni solo in superficie o « sub-surface », le macchine di tipo ASV o Waveglider dispongono inoltre di mezzi elettronici di navigazione autonomi e di un sistema anticollisione AIS che consente di avere missioni più lunghe fino a 2 o 3 mesi, o ancora di più, a seconda delle modalità di propulsione.

In questi veicoli, l'automazione delle attività è spesso limitata alla navigazione e all'attivazione di strumenti di misura lungo traiettorie predefinite. La misurazione è quindi registrata ad alta frequenza in tempo reale nella memoria del computer sistemato a bordo per essere utilizzata solo al momento del suo recupero. Può essere diffusa comunque contemporaneamente a bassa frequenza in superficie mediante un collegamento satellitare di tipo IRIDIUM in mare aperto o di tipo GSM per le operazioni costiere. In ogni caso, un controllo umano a terra 24 ore su 24 deve essere mantenuto per verificare il corretto funzionamento della macchina e garantirne condizioni di sicurezza massima. Una modifica della missione in fase di sorvolo è sempre possibile grazie alla trasmissione di nuovi comandi tramite connessione satellitare e/o GSM.

Recentemente sono stati testati anche droni per la raccolta di campioni in mare (Ifremer) e l'analisi in situ (MBARI, USA). Tali sviluppi sono in corso di trasferimento operativo. Essi richiedono una tecnologia efficace per rispettare i protocolli già stabiliti in occasione degli interventi umani, ma la loro generalizzazione a medio termine è probabile quando il rapporto costo/prestazioni/affidabilità sarà migliore di quello di un intervento specifico su nave in mare.

### 3. Elenco (non esaustivo) dei veicoli autonomi esistenti in Europa

#### 3.1 Robot sottomarini operativi

##### ROV semi-autonomi

Il veicolo Victor6000 messo in servizio da IFREMER nel 1998 era una macchina interamente telecomandata dalla superficie e abbastanza pesante riservata alle operazioni di grande profondità. Fu completato nel 2016 da un ROV ibrido « ARIANE » che dispone di una propria fonte di energia sotto forma di batterie Lithium. L'unico collegamento alla superficie è la fibra ottica di comunicazione. Questo attrezzo permette immersioni di otto ore, a profondità massima di 2500 metri, per missioni di intervento sul fondo (con braccio di manipolazione), di prelievo, di ispezione o di cartografia ottica ed acustica.

L'architettura della propulsione e i sensori di navigazione permettono di lavorare su ogni tipo di fondo, compreso le zone di accesso difficile come i Canyon sottomarini. Dotato di telecamere HD e di una fotocamera digitale orientabile, ARIANE può effettuare ispezioni ottiche di alta qualità e realizzare fotogrammi (o mappatura ottica 3D) ad alta risoluzione. Attualmente sono disponibili due configurazioni di carichi utili: 1/ configurazione « esplorazione e prelievo » con bracci telemanipolatori (5 e 7 funzioni), un cestino, una macchina fotografica digitale orientabile e strumenti di campionamento (aspirapolvere per la fauna selvatica); 2/ configurazione « cartografia » con un sensore multifunzione e la fotocamera digitale orientabile.

Il HROV ARIANA può essere operato da una nave costiera tipo « L'Europe » nel mare mediterraneo. Esso permette di rispondere alle richieste per le quali altri attrezzi d'intervento profondi esistenti (tipo Nautilo o Victor 6000) non sono necessariamente adattati a causa della loro messa in operazione più complessa a partire da navi d'alto mare, della loro programmazione a lungo termine e di costo sempre elevato.

##### AUV interamente autonomi

IFREMER dispone di due veicoli autonomi: *Aster<sup>x</sup>* et *Idef<sup>x</sup>*.

« Sono veicoli subacquei autonomi dedicati al riconoscimento scientifico per le margini continentali fino a 2850 metri di profondità. Essi effettuano immersioni senza collegamento fisico con la nave in superficie e senza controllo da parte dell'operatore. Di medie dimensioni, questi veicoli possono trasportare carichi scientifici su profili fino a 100 chilometri di lunghezza. Dispongono di un catalogo di carichi utili diversi, tra i quali: sonde multicanale o sedimenti, profilatori di corrente, CTD, magnetometri e altre apparecchiature tipo « embedded » configurabili con interfacce adattabili. »

Questo tipo di AUV semi-profondo è essenzialmente dedicato allo studio dei fondali marini o della colonna d'acqua per vari obiettivi scientifici, nonché alla ricerca di obiettivi scientifici, di relitti o di oggetti. La loro messa in operazione sulle navi costiere permette una mobilitazione rapida a costi ragionevoli.

Il mercato dei mini-AUV (LAUV per Light Autonomous Underwater vehicle) comincia ad essere attivo sin dagli anni 2010. Possiamo citare per la Francia i sistemi COMET di RTSYS dedicati tra l'altro all'acustica subacquea. Altri fornitori stranieri offrono in questo segmento prodotti dedicati alle operazioni di difesa o civili con attrezzi di varie dimensioni e capacità; tra i costruttori più conosciuti possiamo citare LSTS nel Portogallo e OCEANSCAN negli Stati Uniti.

### Mini-robots sottomarini

Di recente, L'unità IFREMER di Sète (Occitania, UMR MARBEC) ha acquistato un mini robot subacqueo completamente autonomo, progettato e prodotto dalla società francese NOTILOPLUS con sede a Marsiglia. Nella sua versione originale dispone soltanto di una telecamera incorporata tipo GOPRO e di un sistema di monitoraggio subacqueo per un costo inferiore a 5000 euro. La ditta NOTILOPLUS ha appena concluso nel 2019 un importante mercato con la compagnia CMA-CGM nella regione Sud-PACA per la consegna di una flotta di robot di ispezione autonomi<sup>2</sup>.

Il robot MARBEC servirà al monitoraggio sperimentale delle linee di pesca in Corsica (progetto FEAMP-GENREC) per il controllo dell'attività dei predatori, in particolare i pesci spada intorno a un palangaro lungo diversi chilometri.

Anche se sul mercato esistono numerosi mini-ROV a cavo, quelli autonomi restano poco numerosi: si può citare il FIFIFISH V6 di QYSEA, un robot multidirezionale dotato di 6 propulsori che gli permettono di muoversi alla maniera di un ROV classico. I primi test sono stati condotti al Sea-Aquarium du Grau-du-Roi in regione Occitania.

Un altro robot di produzione francese ma telecomandato via cavo è stato testato nel 2018 sempre nell'acquario del Grau-du-Roi. Proposto dalla Start-Up IOS, il suo interesse maggiore nei confronti della concorrenza è di poter collegare facilmente vari moduli configurabili che permettono di realizzare svariate missioni di monitoraggio<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=U1LQGosgiSo>

<sup>3</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=DeDh2HXPXcw>

## 3.2 Robot di superficie operativi

### Il Waveglider di Liquid-Robotics (LAMMA-IFREMER)

Il concetto innovativo del Waveglider si basa sull'impiego dell'energia meccanica delle onde, permettendo così al veicolo di affrancarsi dai vincoli legati alla propulsione. Sviluppato nel 2003, è stato gradualmente migliorato dalla società americana Liquid-Robotics che ne detiene il brevetto. Non esiste un altro sistema direttamente concorrente per questo tipo di tecnologia che consenta missioni autonome di lunghissima durata. La macchina è controllata dalla terra tramite un'interfaccia Internet, sia direttamente dal proprietario, sia ricorrendo al servizio offerto da Liquid-Robotics nel suo centro di controllo californiano, operativo 24 ore su 24.

La strumentazione scientifica di base consente la navigazione autonoma e la misurazione di parametri idrologici. In opzione può essere dotato di un fluorimetro e di un correntometro doppler. Nel futuro, sarebbe anche possibile aggiungere un «guinzaglio» flessibile, lungo diversi metri, che permetterebbe di deportare un lotto supplementare di strumenti (ad esempio acustico).

### Il veliero autonomo VAIMOS (IFREMER-ENSTA)

Questo veicolo è stato concepito nel 2012 come un progetto di scuola per garantire la guida automatica di una piccola barca a vela con « deriva » con una propulsione « dolce » (vele + energia solare complementare) consentendo missioni di lunga durata senza carburante in regioni poco soleggiate. Si tratta di una nave di lunghezza 3m65 che pesa 300kg. Può essere programmata per coprire aree di diversi chilometri. Gli strumenti a bordo sono paragonabili a quelli del Waveglider e alimentati da batterie.

Il veliero ha partecipato a varie prove e corse in mare aperto. Ha così percorso oltre 100 chilometri alla punta della Bretagna. Trattandosi di uno strumento concettuale, esso non ha avuto un uso pienamente operativo, in particolare a causa dei problemi di sicurezza marittima che può porre l'utilizzazione di un attrezzo non abitato e poco manovrabile nelle zone costiere<sup>4</sup>.

### Il drone per prelievi SPEEDO (IFREMER)

Sviluppato per facilitare i prelievi destinati al monitoraggio costiero (inizialmente Direttiva Quadro sull'Acqua (DCE in francese), il drone SPEEDO risponde ad un capitolato d'appalto ben preciso:

- spostarsi automaticamente dall'intervallo al punto di campionamento
- non andare a più di 500 metri dalla costa,
- effettuare misurazioni idrologiche in subsuperficie,
- prelevare campioni d'acqua con una cadenza prestabilita, secondo un protocollo rigoroso e sistematico.

Il robot dispone di una propulsione elettrica non inquinante collegata ad una batteria ricaricabile che consente un'autonomia di alcune ore. Pesa meno di 20 kg con un pescaggio molto basso di 10 cm.

La fase di sperimentazione è iniziata nel 2016 e si concluderà nel 2019 con diverse missioni operative sulla costa atlantica<sup>5</sup>.

### 3.3 Alcuni veicoli sperimentali nel mondo

Proseguendo lo sviluppo dei droni aerei, molti progetti sono attualmente in corso per la realizzazione di droni sottomarini destinati ad usi diversi. In questo campo, la protezione dell'ambiente suscita numerose azioni integrate, che molto spesso provengono da scuole di formazione professionali o dalle università, che sfociano spesso in progetti di robotizzazione di alcune attività legate al monitoraggio ambientale marino.

Fra tutti questi progetti che hanno una certa visibilità su Internet, possiamo citare alcuni esempi:

Il robot MOS/AUV sviluppato dall'Università di Okayama in Giappone permette, con un volume ridotto, di evolversi autonomamente in ambiente contaminato. Dispone di un sistema di visione intelligente, ed è in grado di prendere decisioni automatiche senza intervento umano. Recentemente provato in piscina, potrà disporre nel futuro di una propulsione a batteria ricaricabile ad induzione<sup>6</sup>.

Il drone marino Larval-Bot sviluppato dall'Università australiana di Queensland: dotato di una fotocamera intelligente permette non solo di monitorare in maniera autonoma il progressivo degrado della grande barriera corallina, ma anche di effettuare missioni di ripopolamento larvale con un « dispersore » collegato da un guinzaglio sotto la superficie<sup>7</sup>.

Il robot marino THOMAS sviluppato dal NOC in Inghilterra: somigliante ad un hovercraft, questa nave autonoma di tipo catamarano leggero permette di esplorare «hotspot» di biodiversità. Provato nel 2016 attorno alle Scilly islands, ha permesso di misurare i parametri del « Mixed Layer Depth front » lungo il litorale inglese<sup>8</sup>.

Il « laboratorio automatico » del MBARI (USA) è stato sviluppato specificamente per la raccolta di campioni ai fini dell'analisi del DNA. È imbarcato dentro un AUV classico d'alto mare (lungo range AUV) e può realizzare fino a 60 campioni per un periodo di circa 20 giorni ad una profondità variabile fra 0 e 300 metri. Questo attrezzo ha effettuato nel 2018 la sua prima missione operativa<sup>9</sup>.

---

<sup>5</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=egrV-JLrL1s>  
[https://wwz.ifremer.fr/content/download/91762/file/4\\_11\\_15\\_Speedoo.pdf](https://wwz.ifremer.fr/content/download/91762/file/4_11_15_Speedoo.pdf)

<sup>6</sup> <https://phys.org/news/2014-12-autonomous-underwater-robot-intelligent-3d.html>

<sup>7</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=D1qtR2OAVDM>

<sup>8</sup> <https://www.asvglobal.com/tag/thomas/>

<sup>9</sup> <https://www.mbari.org/irauv-and-esp/>

Il drone marino SPHYRNA di Seaproven (Mayenne, Francia). Si tratta di un catamarano automatizzato che può accogliere qualsiasi tipo di strumentazione destinata alla raccolta di parametri in-situ in alto mare e finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea per la calibrazione dei dati satellitari<sup>10</sup>.

Il catamarano SQUIRTLE dell'Università di Coimbra in Portogallo: sviluppato nel 2013, questo ASV è costruito sopra 2 kayak e alimentato da due motori a benzina. È stato progettato per il monitoraggio degli estuari e dispone di un sistema di guida visiva automatizzato. Esso è destinato essenzialmente alla realizzazione di profili batimetrici. L'Università di Marsiglia (MIO-PYTHEAS) dispone anche di uno strumento analogo di dimensioni ridotte destinato all'osservazione dei parametri dell'onda superficiale<sup>11</sup>.

Il catamarano Energy Observer finanziato dal laboratorio LITEN del CEA: anche se sia pilotato da un equipaggio umano, questo attrezzo varato nel 2017, è la prima nave senza vela completamente autonoma in energia. Lungo 30 metri, è azionato a l'idrogeno che è in grado di fabbricare egli stesso. Si tratta di un equivalente della sfida «Solar impulse» nel campo marino ed è dedicato principalmente a scopi pedagogici. Attualmente effettua una missione di 6 anni su tutti i mari del mondo<sup>12</sup>.

### 3.4 Sciame di droni

Numerosi sviluppi basati sull'uso dell'Intelligenza Artificiale sono attualmente condotti nei laboratori universitari per la supervisione automatizzata « multi-robot ». Tra le prime azioni che hanno beneficiato di un finanziamento europeo, si può citare l'uso sperimentale di più AUV nel quadro dei progetti MASTIII (2000) e più recentemente nel 2016 l'attuazione di una flottiglia di 7 Gliders da parte dell'Università di Kiel (DE) e dell'Istituto GEOMAR per l'osservazione dei vortici al largo del Perú<sup>13</sup>.

Questo tipo di dispiegamento, ancora molto costoso, rimane sperimentale ed è soprattutto proiettato in un prossimo futuro da istituzioni militari, in particolare per azioni di sminamento (progetto DCNS 2019)<sup>14</sup>.

In questo registro si può anche citare la raccolta di parametri ambientali a scopo militare e civile dalla Navy americana con lo spiegamento contemporaneo di 50 gliders nell'Oceano Atlantico<sup>15</sup>.

---

<sup>10</sup> <http://www.seaproven.com/nos-realizations/sphyrna/>

<sup>11</sup> [https://www.researchgate.net/figure/The-Squirtle-ASV\\_fig1\\_289795245](https://www.researchgate.net/figure/The-Squirtle-ASV_fig1_289795245)

<sup>12</sup> <http://www.energy-observer.org/en/>

<sup>13</sup> <https://www.hydro-international.com/content/news/gliders-swarm-tracks-newborn-eddy>

<sup>14</sup> <https://www.belgium-naval-and-robotics.be/fr/eca-group-systeme-robotise-pour-la-guerre-des-mines-umis/>

<sup>15</sup> <https://navaltoday.com/2018/08/01/us-navy-working-on-breaking-ocean-glider-swarm-record/>

### 3.5 Boe di misura mobili autonome

In connessione con i sistemi mobili e nel quadro del monitoraggio ambientale è utile citare gli sforzi compiuti negli ultimi anni per l'installazione di boe mobili che consentono il monitoraggio di un punto di misurazione su più mesi o anni. Per la Francia, IFREMER ha messo a punto il sistema MAREL-MOLIT, concepito come una mini-nave ancorata completamente automatizzata in grado di imbarcare una strumentazione configurabile. Queste boe autonome sono attualmente utilizzate alla foce dei grandi fiumi<sup>16</sup>.

Tra i sistemi mobili dotati di strumenti scientifici va ricordata anche la rete di galleggianti ARGO e Bio-ARGO attualmente dispiegata in tutto il mondo per il monitoraggio dei parametri fisici e ambientali dell'oceano globale. Questo tipo di « drifter/profiler » verticale può anche essere utilizzato su richiesta tramite IFREMER per misure locali. La sua caratteristica principale è di derivare nelle correnti susuperficiali con la capacità di misurazione per immersione successive sulla verticale fino a 1000 metri. Ogni dieci giorni, si immerge a 2000 metri prima di risalire lentamente in superficie effettuando le misurazioni lungo la colonna d'acqua e poi trasmette tutti i dati scientifici via comunicazione satellitare durante 10 ore<sup>17</sup>.

---

<sup>16</sup> [https://wwz.ifremer.fr/rd\\_technologiques/content/download/69627/916529/file/ifremer\\_plate-forme\\_%20\\_MAREL%20\\_v1.0.pdf](https://wwz.ifremer.fr/rd_technologiques/content/download/69627/916529/file/ifremer_plate-forme_%20_MAREL%20_v1.0.pdf)

<sup>17</sup> <https://www.odatis-ocean.fr/activites/chantiers-et-projets/programmes-et-projets-de-recherche/bgc-argo/>

## **4. Cooperazione transfrontaliera per l'acquisto di un Waveglider**

La necessità di un monitoraggio progressivo delle acque costiere e transfrontaliere fra l'Italia e la Francia, ha condotto i vari enti pubblici presenti nelle cinque regioni del programma EU-Marittimo a collaborare sin dal 2010 attraverso diversi progetti: MOMAR, SICOMAR, IMPACT, SICOMARPLUS, MATRAC ecc.

Parallelamente alla creazione di una rete di radar d'onda che permette d'ora in poi di coprire gran parte del settore costiero Marittimo e di realizzare missioni diverse che consentano di acquisire una migliore conoscenza dell'ambiente, Il LAMMA ha deciso, con la partecipazione di IFREMER, di acquistare un attrezzo di tipo Waveglider destinato alla misurazione di parametri superficie/subsurface durante missioni lunghe. L'attrezzo è stato utilizzato dal 2015 per prova su missioni di breve durata (meno di una settimana) e poi gradualmente su missioni più lunghe di circa 10 a 15 giorni.

Gli strumenti presenti sul veicolo LAMMA SV3 consentono di misurare i parametri idrologici (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, torbidità) nonché di realizzare misure di fluorescenza per identificare la presenza di alcune molecole in mare: pigmento clorofilla-a per la stima dell'attività biologica, ma anche naftalene e fenetremma (HAP) legati alla presenza di idrocarburi leggeri e pesanti.

Le misurazioni sono trasmesse direttamente a cadenza ridotta tramite un collegamento satellitare per tutta la durata della missione. Tutte le misurazioni ad alta frequenza sono disponibili a posteriori dopo il recupero della Waveglider. Quest'ultimo è inoltre dotato di un misuratore di portata doppler (3D-ADCP) che registra le variazioni relative della velocità della corrente fino a 60 metri di profondità per passo di 1 metro. Una campagna di calibrazione degli strumenti è stata effettuata nel quadro del progetto MARTTIMO-IMPACT en 2019.



## **5. Prospettive d'uso dei robot autonomi : quadro metodologico**

### **5.1 Dispiegamento operativo del veicolo Waveglider**

Questo veicolo autonomo pu` essere dispiegato sia da una nave classica con portico sia da una barca leggera o un gommone grande con protocollo adeguato.

- Dispiegamento proprietario

Cf. Documento interno LAMMA.

- Dispiegamento con servizio fornitore

Cf. Documento interno IFREMER « Mise en oeuvre du Waveglider sur navire Océanographique », 2017, Ch. Mazzara, resp. sicurezza IFREMER-Tolone.

### **5.2 Le sfide del mantenimento di un sistema marino autonomo**

Lo sforzo di mantenimento da fornire per la gestione di una o più macchine autonome è piuttosto consistente. Diversi paesi della Comunità europea dispongono di propri centri tecnici civili con dei mezzi logistici e delle competenze tecniche necessarie per la manutenzione e il mantenimento in condizione operativa di veicoli subacquei marini sul lungo termine.

La maggior parte di questi veicoli operativi, telecomandati o autonomi, sono dedicati all' esplorazione oceanografica o intervengono a sostegno di missioni ambientali. Tra i principali centri europei possiamo citare MARUM-Università di Brema per la Germania (ROV,AUV e Waveglider dal 2014), SAMS Istituto marino scozzese (AUV,Gliders) e NOC Institute national (ROV,AUV,ASV,Gliders) per il Regno Unito, FOF-Ifremer/Genavir (AUV), DT-INSU (Gliders) per la Francia, SOCIB Centro di osservazione costiera delle Baleari in Spagna (Gliders), OGS nel Mare Adriatico (Drifters), ISMAR La Spezia in Liguria (Glider,Drifters) e LAMMA (Walider) in Toscana vege in Italia.

#### Logistica utile

La manutenzione delle piattaforme mobili destinate ad essere immerse per un periodo più o meno lungo in acqua salata, richiede infrastrutture adeguate per lo smontaggio/rimontaggio periodico delle strumentazioni scientifiche e del veicolo stesso, compreso un portale per lo spostamento dei carichi pesanti, mezzi di prove elettriche e meccaniche, una piscina di prova per il bilanciamento dei carichi in piena acqua e, se possibile, un accesso diretto al mare o mezzi di trasporto adeguati al tipo di macchina per le prove tecniche preliminari.

Per i veicoli sottomarini capaci di andare sotto i 50 metri di profondità, l'impiego di un cassone iperbarico è indispensabile per la verifica preventiva della tenuta e della resistenza degli elementi immergibili alle profondità desiderate. Per accompagnare il veicolo, l'uso di un'imbarcazione leggera di tipo « gommone » (lungo 6-7 metri) è spesso necessario per garantire la buona esecuzione delle operazioni di messa in sicurezza o di impiego del veicolo.

### Competenze da sviluppare e mantenere sul lungo termine

Oltre alle competenze di base nel campo della meccanica, dell'elettricità e dell'informatica industriale, è necessario acquisire nel corso del tempo competenze specifiche all'ambiente marino e alla diagnosi «orizzontale» vale a dire coinvolgendo più discipline allo stesso momento. Le prove di laboratorio devono essere effettuate con apparecchi analizzatori e con connettori specifici, esterni alla macchina.

Per le macchine a propulsione pesante (ROV e AUV profondi), l'impiego in mare è perlopiù gestito da un team operativo specializzato. Quando l'attrezzo è autonomo, il suo spiegamento è semplificato e le operazioni sono generalmente effettuate direttamente dalla squadra di manutenzione. In questo caso, invece, il pilotaggio a distanza dalla terra richiede un apprendimento specifico e una qualifica di «pilota» per essere in grado di svolgere missioni in condizioni di sicurezza massima al fine di preservare l'integrità dell'attrezzo, ma anche dell'ambiente materiale o umano che lo circonda. Questa sorveglianza durante tutta la missione richiede peraltro una disponibilità 24 ore su 24 sotto forma di «turni di guardia» e di una presenza extra-periodi lavorativi (di notte, o a fine settimana) che implicano un certo numero di vincoli umani e giuridici.

Per citare l'esempio della DT-INSU in Francia, il gruppo di manutenzione a terra è composto da 4 persone occupate a gestire un parco di circa una decina di macchine, di cui 3 o 4 possono essere operative contemporaneamente in mare. Le competenze tecniche vengono distribuite su tre agenti a tempo pieno formati a più discipline e inquadrati da un responsabile delle operazioni.

Quando la squadra è ridotta o insufficiente o il parco macchine troppo ridotto per giustificare un impiego a tempo pieno, è necessario ricorrere a supporti tecnici a distanza (fornitori) o a subappalti esterni per effettuare diagnosi difficili o alcune operazioni delicate: smontaggio della macchina, modifiche, funzionamento specifico, pilotaggio, ecc.

Il ricorso a queste competenze esterne è difficile da organizzare a causa delle competenze specialistiche richieste e spesso scarse in campo marino. Le poche società in grado di intervenire hanno peraltro dei piani di attività generalmente tesi. Questo tipo di mobilitazione esterna può essere previsto solo in caso di disposizioni imperative: guasto duro, necessità di sostituire il personale permanente, operazioni di manutenzione eccezionale ecc. Ha un costo finanziario da non sottovalutare pari a circa 2000 euro al giorno nel 2020. Nel caso di una squadra ridotta, la diagnosi a distanza deve essere privilegiata sotto forma di estensioni di garanzia o di contratti di assistenza specifici.

## Usura e manutenzione « di routine »

Un attrezzo regolarmente utilizzato in mare (più di due missioni lunghe all'anno) invecchia rapidamente ed è indispensabile procedere ad una manutenzione regolare che può essere organizzata in 3 livelli d'intervento:

**Manutenzione ordinaria**, che deve sistematicamente svolgersi prima e dopo una missione e che comprende: 1/ una fase di «mobilitazione» richiedendo test elettrici e informatici completi, se possibile in piscina o in vasca, con l'ausilio di un check-list standardizzato e da programmare con sufficiente anticipo per ottenere un tempo di reazione ragionevole in caso di guasto rilevato; 2/ una fase di «smobilitazione» che implica operazioni di pulizia e di messa in sicurezza delle attrezzature scientifiche e di dichiarazione scritta delle anomalie rilevate durante le operazioni che possono dar luogo ad interventi extra-ordinari di manutenzione. La manutenzione ordinaria include anche lo smontaggio / rimontaggio degli strumenti scientifici ai tempi di calibrazione.

Tutte le anomalie rilevate in mare e durante la smobilitazione devono essere registrate in schede standardizzate. In seguito, si dovrà stabilire un programma di manutenzione in funzione della gravità di ciascuna anomalia. Tutte le operazioni devono essere incluse in un processo retroattivo e documentato tipo ISO9001.

**Manutenzione imprevista o occasionale**, che deve essere organizzata in modo rapido in caso di guasto di uno strumento o di un organo del veicolo. Ogni anno deve essere stanziato un « budget » preventivo per questo compito, al fine di evitare un blocco troppo lungo dell'attrezzo.

**Manutenzione eccezionale**, da programmare ogni 2 anni per un controllo tecnico standard delle funzionalità di navigazione della macchina. Tale controllo deve essere effettuato secondo una procedura standardizzata e i risultati devono essere riportati in una relazione dettagliata.

## Invecchiamento tecnologico e aggiornamenti

Al di là dei cinque anni di utilizzo, qualsiasi attrezzatura regolarmente utilizzata in mare richiede una revisione dettagliata che comprende spesso lo smontaggio completo del veicolo per cambiare alcune parti usurate o danneggiate, verificare lo stato dei connettori, riparare i colpi subiti al mare, installare nuove versioni di software o nuove attrezzature scientifiche. Si tratta di un'operazione lunga che comporta una sospensione di diversi mesi e che deve essere programmata con almeno due anni di anticipo.

Occorre inoltre tener conto dell'invecchiamento di alcuni componenti elettronici. I componenti elettrici sono in genere venduti con MTBF di 5 o 10 anni, e i moduli elettronici utilizzati in condizioni marine spesso severe (calore > 40° in superficie, corrosione, depositi salini, scosse) si rompono regolarmente oltre un certo limite. Inoltre, l'obsolescenza di alcuni componenti o delle schede elettroniche a bordo è spesso rapida ed è indispensabile prevedere uno stock di pezzi di ricambio su alcuni elementi critici quando l'attrezzo è destinato ad essere utilizzato regolarmente più di una decina di anni.

Quando alcune attrezzature diventano obsolete o quando la garanzia non è più supportata dal fornitore, è necessario prendere in considerazione un adeguamento dell'attrezzo. Questa «rifusione globale» comporta costi supplementari non trascurabili, che devono sempre essere confrontati con la sostituzione completa del veicolo con uno più recente di nuova generazione dopo l'ammortamento dell'investimento iniziale.

### Calibrazioni

Alcuni strumenti scientifici possono subire derivazioni nel tempo e necessitano di essere regolarmente ricalibrati. È il caso delle sonde di conducibilità-temperatura e di pressione (GPCTD) ad esempio sul Wavglider, nonché dei sensori di ossigeno disciolto e di torbidità che, a seconda del numero di missioni effettuate, devono essere ricalibrati ogni 2 o 3 anni.

Per quanto riguarda i fluorimetri costruiti a base di diodi monofascio, la deriva in lunghezza d'onda dipende dal tasso di attività elettrica e a seconda del tipo di uso, le calibrazioni devono essere effettuate annualmente (uso continuo) o in modo aleatorio (uso frazionato), sapendo che questa operazione può essere lunga e costosa. La calibrazione deve essere condotta una prima volta alla ricezione dell'apparecchio per ogni canale (CHLA e HAP) e poi, su decisione dell'utente, a seconda del tipo di missione da effettuare (grande precisione richiesta o no)<sup>18</sup>.

Durante una missione di sorveglianza effettuata a seguito di un incidente di traffico marittimo e in presenza di inquinanti già individuati, può essere necessario prevedere una calibrazione specifica per le molecole contenute negli inquinanti in questione poiché le lunghezze d'onda fluorescenti possono variare notevolmente. Tale taratura deve avvenire in un laboratorio attrezzato per la manipolazione di prodotti pericolosi e con personale autorizzato.

[http://www.jerico-ri.eu/download/filebase/jerico\\_fp7/deliverables/D4\\_2\\_Report%20on%20Calibration%20best%20practices\\_v1-3rev.pdf](http://www.jerico-ri.eu/download/filebase/jerico_fp7/deliverables/D4_2_Report%20on%20Calibration%20best%20practices_v1-3rev.pdf)

Un documento di riferimento è disponibile in allegato per la ricalibrazione della GPCTD e del Flurorimetria HAP, sono archiviati nei rapporti del progetto SICOMARPLUS.

## 6. La gestione delle misure scientifiche

La gestione delle misure acquisite da una piattaforma mobile autonoma pone una serie di difficoltà tecniche relative all'acquisizione, al pre-trattamento, all'archiviazione, alla diffusione, alla visualizzazione e all'archiviazione dei dati.

Per l'acquisizione, si tratta di adattare la frequenza di misurazione alla velocità di avanzamento della piattaforma. Quest'ultima può essere compresa tra 0 (punto fisso) e generalmente 3 m/s (circa 6 nodi) per un AUV a propulsione classica, 1m/s (2 nodi) per un Waveglider e solo 0,25 m/s (0,5 nodi) per un Glider. Per una nave o una barca veloce con propulsione elettrica, la velocità detta «nominale» che consente l'acquisizione di misure correnti metriche è compresa tra 2 e 3 nodi. Nel caso del Waveglider, la velocità di avanzamento può variare dal semplice al doppio e subire accelerazioni/decelerazioni parassite legate alla propulsione meccanica. Per una macchina a propulsione elettrica subsurface (AUV) la velocità può essere molto più regolare, mentre un ASV, come il Waveglider sarà soggetto a movimenti supplementari dovuti alle onde e al vento.

In ogni caso, un'acquisizione ogni 10 metri può essere considerata un buon compromesso per garantire un monitoraggio ambientale accurato su piccola scala. Ciò darà una frequenza di misurazione massima di 1/40s (0,025 Hz) per i Gliders classici, 1/10s (0,1 Hz) per il Waveglider e circa 1/3s (0,33Hz) per le oltre macchine a propulsione elettrica.

A seconda della lunghezza della missione e del tipo di traiettoria da percorrere, tali frequenze potranno essere ridotte di un fattore da 2 a 10. Il passo di campionamento minimo può effettivamente essere limitato intuitivamente a 100 metri, tenuto conto della risoluzione attuale dei satelliti ambientali SENTINEL, che è di 300 metri (rapporto nominale da 1 a 3 da mantenere tra misura satellitare e misura in situ per garantire una buona intercalibrazione dei dati).

Il pretrattamento presuppone che la misurazione, prima dello stoccaggio dei dati, sia corretta dalle le distorsioni specifiche di ciascun sensore e per i movimenti specifici dell'attrezzo stesso:

- la correzione delle distorsioni può essere effettuata direttamente nello strumento fissando i coefficienti di calibrazione in un file di inizializzazione caricato all'avvio o memorizzato nella memoria interna,
- la correzione dei movimenti del veicolo può invece essere effettuata soltanto a posteriori applicando algoritmi specifici per ogni attrezzo, tenendo conto delle accelerazioni subite e della frequenza di campionamento scelta. I parametri giroscopici devono pertanto essere memorizzati alla stessa velocità dei dati scientifici, che comprenderanno anche la pressione per le attrezzature sommerse con un'altezza d'onda variabile. È inoltre necessario conoscere la pressione atmosferica media

La memorizzazione interna di tutte le misure e di tutte le relative informazioni di navigazione deve essere effettuata mediante memorie di tipo SDRAM o dischi rigidi sicuri all'interno della macchina, con capacità sufficiente per effettuare una missione di almeno 7 giorni per un veicolo piccolo o alcune settimane per uno più importante. Le memorie attuali consentono di registrare le misurazioni idrologiche a basso ingombro (in termini di byte) senza vincoli di durata. D'altra parte per le misurazioni correnti doppler durata massima può variare da uno a pochi mesi a seconda del supporto di memorizzazione utilizzato. Per i sistemi di « Digital Imaging » ad alta risoluzione, che richiede un numero elevato di byte, questa durata è attualmente ridotta a una decina di giorni per le riprese automatizzate con una frequenza nominale di 1/5 secondi. Al contrario, nel 2020 non è ancora possibile registrare a bordo « Digital Films » ad alta risoluzione su un periodo che supera una giornata con stoccaggio standard.

La diffusione delle informazioni in tempo reale o leggermente differita nel corso della missione è assolutamente necessaria, tenuto conto dei costi importanti derivanti dall'operazione in mare delle macchine autonome:

- È innanzitutto indispensabile poter verificare fin dall'inizio della missione se tutti gli strumenti di misura immersi sono effettivamente in funzione. Questo controllo deve poi essere effettuato ad intervalli regolari grazie alla gestione di allarmi verificate a terra da un operatore umano. Gli strumenti devono inoltre poter essere riconfigurati in qualsiasi momento (velocità di acquisizione, on/off, reset) a seconda del luogo, del momento o dei possibili danni.
- È poi importante durante tutta la missione poter registrare a terra un certo numero di misurazioni a bassa frequenza per prevenire qualsiasi incidente rilevante che possa portare alla perdita definitiva dei dati: strumento «rotto», memoria interna inaccessibile, entrata d'acqua, avaria grave sull'attrezzo o persino perdita dell'attrezzo nel caso dei Gliders sottomarini o degli AUV.

Questi due vincoli necessitano di mantenere una connessione satellitare permanente di portata sufficiente per restare in contatto con il veicolo in superficie a scopo di emettere comandi e di ricevere dati di posizionamento o sullo stato di salute della macchina stessa (status + allarmi) nonché serie di misure sottocampionate. Per i Gliders classici e per gli AUV, si raccomanda un'emissione in superficie regolare ogni 300m o ogni ora, 1 volta al giorno o meno per un AUV a seconda dei tipi di missione, e in modo permanente su un Waveglider o un ASV per i quali i rischi di collisione in funzione del traffico marittimo sono rilevanti e richiedono una sorveglianza quasi continua a terra.

La visualizzazione delle informazioni diffuse, degli allarmi, dello stato e dei comandi emessi è oggi realizzata di preferenza attraverso un'interfaccia WEB accessibile in continuo da qualsiasi posto di lavoro nel mondo connesso a Internet. In via opzionale, è anche possibile ora controllare in tempo reale la misurazione scientifica già effettuata su grafici regolarmente aggiornati ad ogni connessione satellitare. Durante una missione molto costiera e per distanze inferiori a 5 miglia dalla terra, sarà possibile accoppiare il collegamento satellitare con un collegamento GSM che consenta l'invio periodico di messaggi già formattati e leggibili con una frequenza nominale di circa 1/10 secondi

L'archiviazione delle informazioni ricevute e dei dati misurati è l'ultima fase da realizzare preferibilmente a terra:

- in modo continuo durante la missione per i parametri «visualizzabili» a bassa frequenza già descritti e trasmessi mediante la connessione satellitare,
- a posteriori per tutte le misurazioni ad alta frequenza memorizzate nelle memorie di ciascuno strumento e per quella dell'attrezzo.

Si tratta di una tappa cruciale, tenuto conto del costo globale di un'operazione in mare di una durata minima di diversi giorni, che in genere ammonta a decine di migliaia di euro (compreso il tempo personale e l'ammortamento del materiale), e delle difficoltà di mobilitazione e di pianificazione che pone questo tipo di missione autonoma direttamente dipendente dalle condizioni meteorologiche, senza contare i costi di manutenzione associati (usura, incidenti, avarie).

Lo scarico delle misure deve quindi rispettare un protocollo rigoroso e sistematico al termine di ogni missione per evitare la perdita di dati. Esso è accompagnato da una relazione di fine missione che descrive il luogo, il contesto e gli obiettivi della missione, nonché i percorsi, le condizioni di realizzazione della misurazione e i risultati ottenuti giorno per giorno.

I dati devono essere forniti sotto forma di file numerici con una «etichettatura» codificata che consenta un'archiviazione razionale a lungo termine. Se i dati devono essere riutilizzati a medio termine da altre squadre scientifiche, è necessario seguire una procedura di tipo ISO9001 che preveda l'uso di formati predefiniti e standardizzati a livello europeo. La memorizzazione a lungo termine deve poi essere supportata da un centro dati certificato e protetto, con un diritto di accesso specifico per ogni tipo di dato e soprattutto un sistema di backup ridondante e un servizio di documentazione associato.

Per IFREMER, la conservazione dei dati oceanografici è assicurata dal SISMER nel centro di Brest in una Data Base denominata CORIOLIS che tiene conto di un certo numero di piattaforme mobili: i galleggianti ARGO, i Gliders, le marche dei mammiferi marini, i Ferrybox, i Drifters Lagrangiani etc. La base CORIOLIS è associata ad un sistema documentario a due livelli: ARCHIMER (per la conservazione dei documenti) + SEXTANT (per la loro descrizione)<sup>19</sup>.

In Francia, la gestione dei dati più elaborati destinati agli utenti finali è federata a livello nazionale dal 2016 nel Polo ODATIS con l'obiettivo generale di «facilitare l'uso a lungo termine dei dati delle osservazioni effettuate nell'oceano a partire da misurazioni in situ e telerilevamento»<sup>20</sup>.

In maniera analoga, la gestione materiale dei dati litoranei e costieri è assicurata in modo standardizzato dal 2016 da un'infrastruttura di ricerca pluri-istituti denominata ILICO, gestita congiuntamente da IFREMER e CNRS, e organizzata in varie reti. Tale infrastruttura non tiene attualmente conto delle piattaforme mobili<sup>21</sup>.

---

<sup>19</sup> <http://www.coriolis.eu.org/>

<sup>20</sup> <https://www.odatis-ocean.fr/>

<sup>21</sup> <https://www.ir-ilico.fr/L-infrastructure-de-recherche>

La gestione delle attività «Gliders» è federata a livello mondiale in un gruppo denominato EGO che comprende attualmente 42 membri (istituti o unità di ricerca)<sup>22</sup>.

Nel quadro dei progetti H2020 è stata recentemente creata un'infrastruttura europea per raggruppare i centri di dati oceanografici attraverso un unico portale Internet, al fine di standardizzare e facilitare l'accesso ai dati. La preoccupazione principale del servizio «Metadata» è l'interoperabilità; esso offre la possibilità di informare le campagne oceanografiche, di dare accesso agli osservatori di misure e di presentare i progetti in corso a livello europeo<sup>23</sup>.

## 7. Sviluppi tecnologici in corso

Negli ultimi anni sono stati realizzati progressi tecnologici significativi attorno ai droni, soprattutto aerei, ma anche terrestri e sottomarini. Essi passano attraverso la miniaturizzazione dei componenti meccanici e dei moduli elettronici associati, sempre più standardizzati (telecamere, attuatori, sensori) e attraverso una democratizzazione delle tecniche di intelligenza artificiale sviluppate più di 20 anni fa, ma solo realmente operative da poco. Queste macchine sono destinate ad essere ampiamente utilizzate nei prossimi anni.

Nel settore sottomarino, in cui le condizioni di sfruttamento sono più difficili, la loro diffusione è più lenta, in particolare a causa della mancanza di un controllo visivo, ma anche di problemi di resistenza dei materiali alla pressione e dei fenomeni di corrosione. Fino a poco tempo fa, e con poche eccezioni, le macchine autonome civili sono state finanziate principalmente dall'industria petrolifera o dai grandi istituti di ricerca oceanografici. La maggior parte delle macchine autonome di superficie (ASV) sviluppate dagli Istituti stessi o da imprese private operanti nel settore marino sono multisensori ma spesso ingombranti con un raggio d'azione limitato dal loro sistema di propulsione, tranne il Waveglider. Disponibili in vendita o in affitto, gli ASV consentono tuttavia sorvoli occasionali e possono essere utilizzati su griglie di osservazione locali (« Plume river » in mare, tratti di litorale, radiali al largo dalla costa, ecc.) quando si può avere un budget sufficiente per queste missioni abbastanza costosi. Essi sono complementari alle stazioni di osservazione fisse o ai «punti di osservazione» Gliders organizzati a lungo termine, con in generale traiettorie predefinite e ricorrenti.

Dal 2010, lo sviluppo esponenziale dei droni aerei telecomandati ha permesso di avere componenti standard ad un costo accessibile e mini-droni subacquei autonomi sono apparsi nel settore ricreativo sulla base di tecnologie simili per un budget spesso inferiore alle 5000 euro. Progressivamente, cominciano ad emergere versioni professionali più perfezionate, con una gamma di applicazioni diverse nel settore dell'energia, del trasporto marittimo, dell'idraulica, ecc.

Tuttavia, sono ancora pochi i sensori scientifici ambientali direttamente utilizzabili a bordo su questo tipo di robot senza un notevole sforzo di integrazione, spesso reso complesso a causa della mancanza di informazioni sui protocolli di comunicazione e del condizionamento specifico di questi strumenti.

---

<sup>22</sup> <https://www.ego-network.org/dokuwiki/doku.php?id=public:members>

<sup>23</sup> <https://www.seadatanet.org>



## 7.1 Modulo sensore di misura degli idrocarburi policiclici aromatizzati (IPA / HPA)

Per quanto riguarda la misurazione mediante fluorescenza degli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), esistono diversi sistemi immergibili sul mercato. Alcuni sono totalmente autonomi per l'uso manuale e denominati « fluorimetri di campo »: si possono citare le sonde Seabird, Aquaref, YSI, AMIScience, Sea&SunTechnology, ecc; Altri sono integrabili in un veicolo o in un sistema di bordo e allora denominati «embedded sensor» in inglese. È il caso in particolare degli strumenti Turner-Design, largamente diffusi in ambiente marino e equipaggiati con il Waveglider, nonché delle sonde Wetstar di Seabird Electronics che attrezzano il parco Gliders DT-INSU in Francia.

Inoltre, l'Università di Marsiglia / Istituto M.I.O. ha recentemente progettato e fatto sviluppare dalla ditta ALSEAMAR un sensore miniaturizzato denominato «MiniFluo UV»<sup>24</sup> che permette di caratterizzare i composti disciolti fluorescenti su due lunghezze d'onda caratteristiche, rappresentative della frazione solubile di varie molecole derivate dal petrolio in mare: naftalene, fenazolo, triptofano, pirene, fluorene, e carbarile (pesticidi). Questo sensore è a basso consumo energetico (400mW) e destinato ad essere montato sul Glider francese SeaExplorer distribuito dalla società ALSEAMAR<sup>25</sup> (finanziamento FUI, DGE, ANR e EU)<sup>26</sup>. Il periodo di misurazione standard è di 600 ms con una precisione di 0.01 ug/L per i componenti più comuni. L'esperimento su scala « pilota » nella corrente Ligure nel 2016 ha dimostrato l'utilità specifica di questo sensore per il rilevamento di due tipi di molecole IPA Tryptophan e Phenanthrene<sup>27</sup>.

## 7.2 Contratto di studio SICOMARPLUS per fluorimetria su mini-robot

Dopo queste constatazioni, ci è parso opportuno studiare ulteriormente la possibilità di disporre di un modulo software generico che consenta di integrare facilmente un sensore IPA su vari tipi di macchine e che sia in grado di trasmettere le sue informazioni a terra in modo autonomo tramite comunicazione satellitare e/o GSM.

È l'obiettivo del contratto di studio stipulato con l'Università di Montpellier che ci ha permesso di affinare le soluzioni disponibili e di effettuare alcuni sviluppi necessari nel 2020 . Il Laboratorio di Robotica ha condotto lo studio per valutare l'uso di un fluorimetro su un mini-robot autonomo più flessibile, con un raggio d'azione ridotto e durata di utilizzo limitata di alcune ore.

Questo tipo di sistema “low cost” potrebbe essere dispiegato da uno gommone e consentirebbe un rapido monitoraggio in tempo reale dell'ambiente costiero in aree molto costiere oltre al monitoraggio a lungo termine che può essere effettuato in mare aperto da attrezzature più costose con sistemi già esistenti : Waveglider per il LAMMA, towed C3-Turner CRAY + Profileur vertical per IFREMER, o Glider ALSEAMAR+MiniFluo-UV per l'Istituto MIO.

<sup>24</sup> <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2017.00089/full>

<sup>25</sup> <https://www.alseamar-alcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>

<sup>26</sup> <https://www.alseamar-alcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>

<sup>27</sup> <https://hal-univ-tln.archives-ouvertes.fr/hal-01344021>



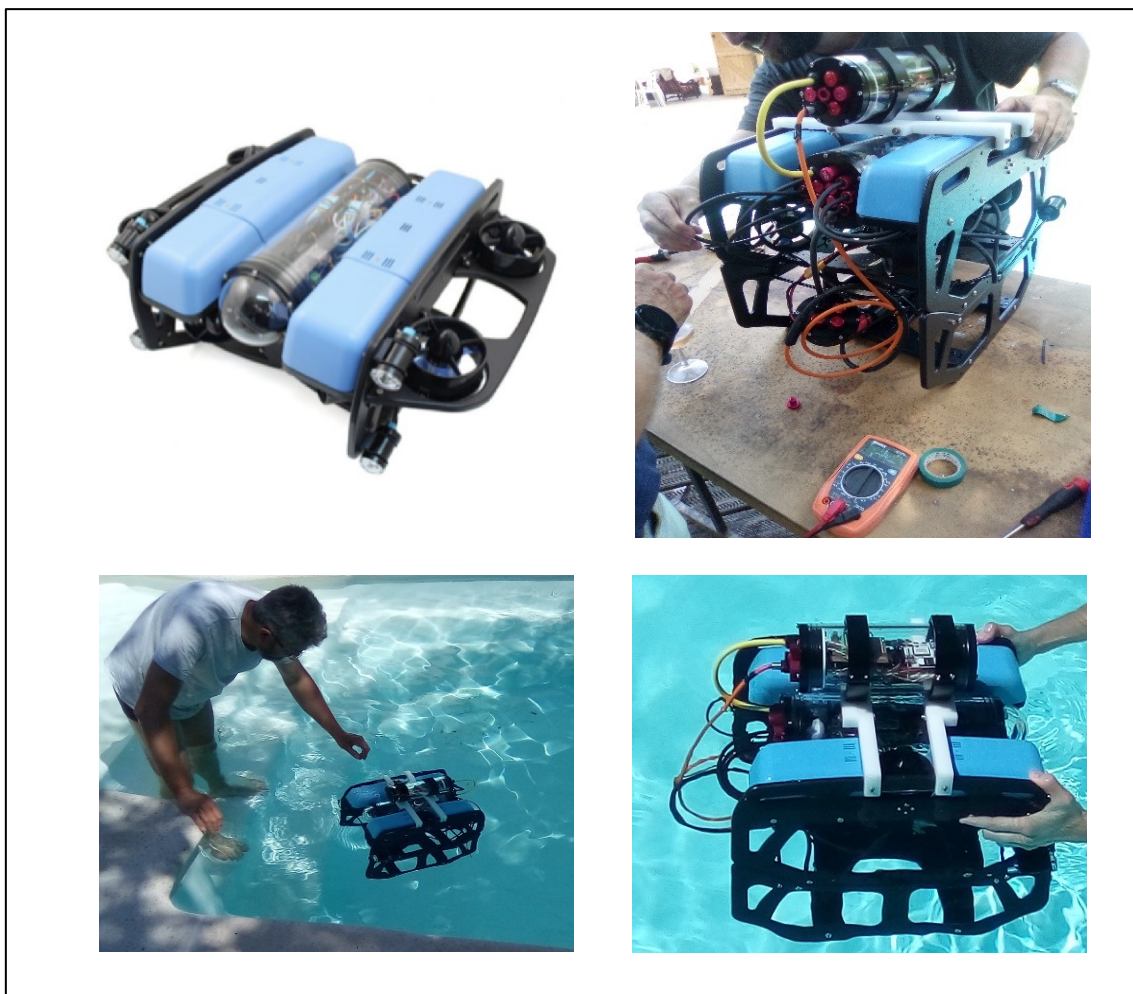


Figura 1. Prove in piscina del mini-robot BLUROV-Kit con sensore ambientale

Un secondo progetto Marittimo (MATRAC)<sup>28</sup>, destinato alla sorveglianza dei porti e nel quale IFREMER è già partner con il laboratorio di geofisica dell'Università di Genova, ha permesso di provare nel 2019 un software sperimentale di supervisione dedicato alla misura adattativa, che potrebbe essere usato in connessione con il mini-robot in un progetto futuro.

<sup>28</sup> <http://interreg-maritime.eu/fr/web/matracacp/projet>

### 7.3 Sviluppi futuri a corto termine

Le applicazioni ambientali dei droni sono sempre più numerose e saranno destinate, in parte, a completare sul campo l'osservazione spaziale ad alta risoluzione. (Cfr. Nota Rivollet 2014, IFREMER-CAPTIVEN). Questi droni ancora oggi spesso telecomandati sono progressivamente dotati delle cosiddette capacità «intelligenti» che conferiscono loro sempre più autonomia.

All'alba del prossimo decennio, la robotica intelligente è oggetto di un'attenzione particolare nei programmi di formazione dei futuri studenti sia a livello nazionale in Francia che a livello locale nel Var con il Polo del Merl<sup>29</sup>, nelle Alpi Marittime con il Polo tecnologico di Sophia-Antipolis<sup>30</sup>, in Liguria e Toscana con le varie università e centri di insegnamento marittimo legati ai porti di Genova, La Spezia e Livorno, senza dimenticare la presenza tecnica del NURC, il centro di ricerca NATO alla Spezia<sup>31</sup>.

La capacità di un robot di prendere autonomamente decisioni in un ambiente isolato (grande profondità, ambiente contaminato ecc.) costituisce un obiettivo essenziale per i robot sottomarini di domani. Anche se le tecniche cominciano a maturare in ambiente terrestre, ci vorrà ancora un po' di tempo per andare al di là dei semplici compiti relativi alla messa in sicurezza dell'attrezzo o alla modifica di un percorso prestabilito.

Con l'associazione della robotica tradizionale e dell'intelligenza artificiale, l'approccio attuale per rendere i veicoli sottomarini più autonomi si concentra su due punti essenziali: «acquisizione di conoscenze sull'ambiente immediato» e «elaborazione di decisioni per agire e muoversi in modo totalmente sicuro». L'utilizzo di supervisor adattivi, esterni tramite una comunicazione in superficie per gli ASV o interna ai calcolatori incorporati per gli AUV, anticipa già la capacità di realizzare una misura detta «intelligente» ottimizzando i tempi di percorrenza e l'energia spesa, ma uno dei blocchi essenziali per queste tecnologie in ambiente sottomarino resta oggi l'autonomia della propulsione.

Parallelamente, sono stati realizzati progressi in mecatronica per aumentare le capacità dell'attrezzo in termini di flessibilità dei movimenti o di abilità. Si possono rapidamente citare sviluppi operativi riguardanti sistemi ibridi o trasformabili<sup>32</sup> nonché gli sviluppi sperimentali incentrati sul biomimetismo delle specie marine: meduse, tartarughe, gamberi, pesci, predatori ecc... l'elenco è lungo.

---

<sup>29</sup> <https://www.univ-tln.fr/L-Universite-de-Toulon-centre-d-excellence-international-en-robotique.html>

<sup>30</sup> [http://users.polytech.unice.fr/~bilavarn/elec\\_gse.html](http://users.polytech.unice.fr/~bilavarn/elec_gse.html)

<sup>31</sup> [https://www.eu-robotics.net/robotics\\_league/news/press/lights-robots-action-land-and-sea-robots-compete-in-erl-emergency-event.html](https://www.eu-robotics.net/robotics_league/news/press/lights-robots-action-land-and-sea-robots-compete-in-erl-emergency-event.html)

<sup>32</sup> <https://spectrum.ieee.org/robotics/noihumads/t-aquanaut-the-underwater-transformer>

## 8. Reti e piattaforme disponibili in caso di incidente transfrontaliero

Di fronte alla possibilità di un inquinamento marino transfrontaliero, È utile ricordare l'attuale contesto amministrativo e individuare rapidamente le varie piattaforme mobili che possono essere utilizzate per il monitoraggio ambientale a medio e lungo termine.

### 8.1 Quadro normativo (Piano POLMAR in Francia)

In Francia, gli interventi d'urgenza in questo settore sono inquadrati dalla prefettura regionale e marittima che decide l'attivazione di un piano organizzatore denominato POLMAR<sup>33</sup>. Oltre alle azioni di primo soccorso condotte dai servizi di Stato, dal CEDRE (Centro di documentazione, di ricerca e di sperimentazioni sull'inquinamento accidentale dell'acqua)<sup>34</sup> e dalle autorità locali, l'Istituto IFREMER può essere sollecitato sin dall'incidente «per stabilire una strategia di sorveglianza sanitaria e ambientale e partecipare al campionamento e all'organizzazione del monitoraggio, il che deve permettere in particolare di definire lo stato di riferimento a monte dell'inquinamento. In un primo tempo si tratta di stabilire un «campionamento iniziale» che consenta di conoscere lo stato di riferimento della contaminazione chimica, che può essere poi confrontato con le successive situazioni di inquinamento, durante il periodo di crisi o in diverse fasi del ripristino della qualità dell'ambiente. Oltre ai campionamenti effettuati al momento dell'attivazione dell'allarme, lo stato di riferimento non inquinante può essere consultato nelle banche dati delle reti di sorveglianza (ROCCH<sup>35</sup> in particolare e REPHY<sup>36</sup>) che possono essere richieste al fine di fornire dati di base su punti situati nelle immediate vicinanze o considerati come punti di riferimento. Il campionamento iniziale è fondamentale e deve essere effettuato molto rapidamente. Il monitoraggio del restauro dell'ambiente che avrà luogo in una fase successiva avrà allora due obiettivi: sanitario e ambientale. Le prime due fasi sono di breve durata (poco prima e durante l'arrivo dell'inquinamento sulla costa) e rendono necessario procedere rapidamente. Nell'ultima fase, dopo l'arrivo dell'inquinamento, la componente sanità pubblica implica una cooperazione con i servizi sanitari ufficiali per determinare i parametri da osservare e le loro modalità di campionamento.»<sup>37</sup>.

Per questo, IFREMER deve stabilire una strategia di sorveglianza valida per tutta la fase di monitoraggio post-incidentale e per il campionamento iniziale che precede. Questa strategia comprende: punti di campionamento, matrice, taxon, numero di campioni, frequenza dei prelievi ecc. Inoltre, uno stato di riferimento delle zone litoranee nelle regioni transfrontaliere Corsica e SUD-PACA è già disponibile grazie alle relazioni DCE e DCSMM realizzate e archiviate da IFREMER<sup>38</sup>. Ulteriori rendiconti transfrontalieri sono stati o sono in corso di realizzazione nell'ambito dei progetti IMPACT e SICOMARPLUS: relazione sulle contaminazioni sedimentarie, relazione sull'accumulo dei rifiuti galleggianti e sull'attuazione di piani di onde per il litorale della Corsica, relazione di analisi sulle composizioni fitoplanctoniche di riferimento al confine del Parco Naturale del Capo Corsica.

<sup>33</sup> <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/dispositif-polmarterre>

<sup>34</sup> <http://wwz.cedre.fr/>

<sup>35</sup> [http://envlit.ifremer.fr/envlit/infos/actualite/2019/le\\_rocch\\_40\\_ans\\_de\\_prelevements](http://envlit.ifremer.fr/envlit/infos/actualite/2019/le_rocch_40_ans_de_prelevements)

<sup>36</sup> [https://envlit.ifremer.fr/surveillance/phytoplancton\\_phycotoxines](https://envlit.ifremer.fr/surveillance/phytoplancton_phycotoxines)

<sup>37</sup> Cf. PLAN POLMAR TERRE – Allegato 2, Amouroux, 2018

<sup>38</sup> <https://envlit.ifremer.fr/envlit>

Il controllo a più lungo termine delle zone transfrontaliere potrà essere effettuato in relazione ad uno stato di riferimento generale che sarà stabilito nel 2020 in relazione ad un Atlante delle zone a rischio previsto dal progetto SICOMARPLUS.

## 8.1 Sistemi disponibili nel 2020

Mentre le operazioni di campionamento iniziale in seguito ad un inquinamento accidentale sono condotte con urgenza e richiedono la mobilitazione diretta del personale che opera sulle coste in modo tradizionale e in un quadro amministrativo rigoroso, il monitoraggio della contaminazione a breve e medio termine, al fine di stabilire il livello di inquinamento supplementare generato dall'incidente rispetto ai livelli abituali di contaminazione, può occasionalmente ricorrere a mezzi supplementari di monitoraggio per controllare l'evoluzione di taluni parametri di contaminazione o idrologici connessi.

Tra i vari sistemi che possono essere utilizzati durante la fase di monitoraggio a medio e lungo termine si possono citare le seguenti piattaforme mobili o semimobili autonome:

- Boa semiautonoma di misurazione NKE-SMATCH (temperatura/salinità superficiale, con fluorimetro opzionale).
- Robot semi-autonomo Vortex, dotato di strumenti di misura standard in idrologia, configurabile rapidamente con altri strumenti (fluorimetro e sonde varie) e dispiegabile da un gommone in zona costiera per missioni di alcuni giorni a seconda della disponibilità tecnica dell'attrezzo.
- Mini-robot di osservazione MARBEC/Notiplus autonomo con telecamera GOPRO per la sorveglianza visiva di specie viventi, fondali e litorali fino a 50 m di profondità, dispiegabile al giorno da un gommone con l'aiuto di un subacqueo per missioni di poche ore.
- Veicolo autonomo Waveglider (LAMMA-Ifremer) attrezzato per le misurazioni idrologiche (Temperatura, salinità, torbidità, ossigeno-dissolto, CHLA) e per le misurazioni di contaminanti (molecole IPA), operativo per diverse settimane ad una distanza minima di 1 miglio dalla costa e per almeno 20 metri di fondo. In opzione, è resa disponibile da IFREMER una videocamera di sorveglianza dei rifiuti.
- Sensore autonomo sperimentale di fluorimetria finanziato in parte dai progetti SICOMARPLUS e MATRAC, adattabile alla domanda su diversi miniRobot e dispiegabili al giorno da un gommone con l'aiuto di un gommone per missioni di poche ore al fine di effettuare griglie di misurazione in zone contaminate (sviluppo in corso).

Tutti questi strumenti possono essere supportati dall'uso a terra di modelli idrodinamici 3D che consentono di ottimizzarne la diffusione e di migliorare la conoscenza spaziale delle condizioni marine e idrologiche (Cfr. rapporto IMPACT sui modelli idrologici ISMAR/ CNR-Oristano/ LAMMA/ IFREMER/ Università di Tolone-Var). I dati satellitari ad alta risoluzione possono anche essere estratti su richiesta dai satelliti SENTINEL disponibili dal 2018.

## Conclusione

L'anno 2020 si colloca in un periodo di transizione per la sorveglianza dell'ambiente marino. Parallelamente ai metodi di monitoraggio tradizionali su punti fissi in vigore da 30 anni, si sviluppano nuovi metodi di osservazione detti «numerici». Sia su vasta scala per l'oceano globale con lo sfruttamento dei dati spaziali e delle piattaforme mobile legere (boe Argo), sia su scala ridotta per la fascia costiera con una misura sempre più precisa che fa ricorso a sistemi sempre più automatizzati.

Questo processo di trasformazione tecnologica è già in atto soprattutto per la gestione e lo sfruttamento dei dati a terra come lo dimostrano gli orientamenti a medio termine del piano strategico IFREMER che anticipa ampiamente i cambiamenti in corso a livello Europeo nonché gli sforzi compiuti dalle cinque regioni del programma MARITTIMO per integrare informazioni e dati scientifici nell'arco di cooperazione e dargli maggiore visibilità. Tuttavia, le sfide tecniche sono ancora numerose e richiederanno nei prossimi anni un lento mutamento delle competenze con sempre maggiore assistenza «intelligente» da parte di macchine semi-automatizzate di tipo « robot ».

A breve termine, è ancora difficile prevedere quali potranno essere gli attrezzi utilizzabili per il monitoraggio ambientale post-incidentale entro il 2030. Per quanto riguarda l'ambiente profondo le risposte sono già date con la diffusione di AUV profondi a lungo raggio d'azione e sistemi ibridi (HROV) imbarcabili su navi più leggeri. Per l'ambiente litoraneo e costiero è auspicabile lo sviluppo di attrezzature meno costose e più autonome che consentano di assistere l'operatore nei suoi compiti più impegnativi: prelievi semiautomatizzati, misurazione a maggiore frequenza, riutilizzo remoto dei dati in tempo reale, utilizzo di piattaforme mobili sempre più flessibili, ecc. Questi nuovi strumenti richiederanno anche una nuova organizzazione del lavoro che consenta di ottimizzarne l'attuazione e il monitoraggio tecnico.



Lavoro svolto per il progetto SICOMARPLUS,  
finanziato dal programma di cooperazione  
Italia-Francia MARITTIMO 2014-2020

## **Annessi**

**A – Bibliografia**

**B – Alcuni « link » internet**



## A – Bibliografia

I. Amouroux I., 2019, Plan polmar terre – Annexe 2 « que faire en cas de pollution chimique accidentelle ? », 13/02/2019, ARCHIMER

Rivollet B., Serre C.E. 2014, « Les drones pour la surveillance environnementale », Note de veille technologique, CAPTIVEN.fr

Isaak T., 2015, « SMILE, la bouée qui veille sur l'environnement en Baie de Seine », Communiqué de presse IFREMER, 17/11/2015.

Isaak T., 2015, «SPEEDO, le drone marin à l'assaut des vagues », Communiqué de presse IFREMER, 04/11/2015.

Bayat et al., 2017, « Environmental Monitoring using Autonomous Vehicles: a survey of recent searching techniques », Current Opinion in Biotechnology, Volume 45, June 2017, Pages 76-84, ISSN 0958-1669. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.009>.

Pooja et al., 2020, « Sensors in Water pollutants Monitoring: Role of materials », 319p., Springer Singapore, ISSN 2662-558X, <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0>.

Dunbabin, Matthew & Marques, Lino., 2012, « Robots for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications », IEEE Robotics & Automation Magazine - IEEE ROBOT AUTOMAT. 19. 24-39. 10.1109/MRA.2011.2181683.

Daniel O.B. Jones et al., 2019, « Autonomous marine environmental monitoring: Application in decommissioned oil fields », Science of The Total Environment, Volume 668, ,Pages 835-853,ISSN 0048-9697,.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.310>.

– Duarte M. et al., 2016, « Application of swarm robotics systems to marine environmental monitoring ». In OCEANS 2016 - Shanghai <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485429>

Duarte M et al., 2016, « Evolution of Collective Behaviors for a Real Swarm of Aquatic Surface Robots », Plos One, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151834>.

– Sung Y., Dixit D., Toketar P., 2019, « Environmental Hotspot Identification in Limited Time with a UAV Equipped with a Downward-Facing Camera », 7 p., submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, [arXiv:1909.08483](https://arxiv.org/abs/1909.08483)

Li Teng et al., 2019 « Coverage Sampling Planner for UAV-enabled Environmental Exploration and Field Mapping », submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, [arXiv:1907.05910](https://arxiv.org/abs/1907.05910)

Fraga J. et al., 2014, « Squirtle: An ASV for Inland Water Environmental Monitoring. », In: Armada M., Sanfeliu A., Ferre M. (eds) ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 252. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03413-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03413-3_3)

Daniel Anne et al., « Développement d'un drone nautique pour le prélèvement d'échantillons d'eau en milieu côtier et estuarien (SPEEdoo) », La Houille Blanche, n° 3, 2016, p. 39-41, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016029>

Frédéric Cyr, Marc Tedetti, Florent Besson, Nagib Bhairy, Madeleine Goutx, 2019 « A Glider-Compatible Optical Sensor for the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Marine Environment », Frontiers in Marine Sciences, 6:110, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00110>

## B – Alcuni legami Internet

### *Servizi francesi per Oceanographic Data Management*

<https://www.seadatanet.org/Metadata>

<https://www.odatis-ocean.fr/qui-sommes-nous>

<https://www.ir-ilico.fr/L-infrastructure-de-recherche>

<http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/ARGO>

<http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/GLIDERS/EGO-gliders>

<https://www.ego-network.org/dokuwiki/doku.php?id=public:whatisego>

### *HROV*

<https://wwz.ifremer.fr/Actualites-et-Agenda/Toutes-les-actualites/Archives/2015/HROV-Ariane-le-dernier-ne-des-engins-sous-marin-de-l-Ifremer>

<https://www.entreprises-occitanie.com/portraits/aurelien-majorel-nous-demarrons-la-commercialisation-de-notre-robot-sous-marin-innovant>

<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/robotique-robot-sous-marin-completement-autonome-56440/> (Japan ROV)

### *AUV*

<https://www.enviro2b.com/2018/11/12/le-drone-sous-marin-larvalbot-a-la-rescousse-des-recifs-coralliens-endommages-par-le-changement-climatique/>

<https://www.ecagroup.com/en/business/futura-sciencescom-auv-a6k-new-explorer-deep-sea>

<https://phys.org/news/2019-03-robots-revolutionise-marine-environmental.html>

<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/robotique-aquanaut-sous-marin-transforme-robot-humanoide-77015/>

### *ASV*

<http://projects.noc.ac.uk/massmo/meet-thomas-marine-robot>

<http://www.seaproven.com/nos-realizations/sphyrna/>

<https://wwz.ifremer.fr/webtv/Thema/Circulation-oceanique/VAIMOS>

## ***Gliders / Waveglider***

<http://www.lamma.rete.toscana.it/news/arriva-il-waveglider-piattaforma-oceanografica-avanzata>

[http://www.ismar.cnr.it/infrastructures/instrumentation-and-equipments/Slocum-Glider-Teresa/index\\_html?set\\_language=en&cl=en](http://www.ismar.cnr.it/infrastructures/instrumentation-and-equipments/Slocum-Glider-Teresa/index_html?set_language=en&cl=en)

<http://www.dt.insu.cnrs.fr/spip.php?article8> (Parc national français de gliders)

## ***Bouées automatisées***

<http://www.captiven.fr/sites/default/files/Fiche%20information%20MAREL.pdf>

## ***Float of vehicles***

<https://navaltoday.com/2018/08/01/us-navy-working-on-breaking-ocean-glider-swarm-record/>

<https://www.naval-group.com/fr/news/dcms-reussit-une-premiere-europeenne-le-deploiement-coordonne-de-trois-types-de-drones/>

## ***Lotta all'inquinamento marittimo***

<http://wwz.cedre.fr/>

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/dispositif-polmarterre>

<http://polmar.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/polmar/index.php?page=references-centre-de-marseille>

[http://www.haute-corse.gouv.fr/IMG/pdf/Disposition\\_specifique\\_POLMAR-terre.pdf](http://www.haute-corse.gouv.fr/IMG/pdf/Disposition_specifique_POLMAR-terre.pdf)

<http://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/3757/21946/file/O>

<http://www.dcsmm-d4.fr/la-directive-cadre-strategie-pour-le-milieu-marin-dcsmm>

## ***Sensori***

<https://www.carnot-mines.eu/fr/avec-sa-technologie-du-%C2%AB-sens-%C3%A9lectrique-%C2%BB-elwave-%C3%A9quipe-les-robots-d%E2%80%99un-6e-sens>

<https://sciencepost.fr/ce-robot-sinspire-des-crevettes-pour-percer-la-roche/>

<https://www.mbari.org/lrauv-and-esp/> (US AUV automatic laboratory)

## ***Intelligent Supervision***

[https://unige.it/ricerca/prog\\_euint/vetrina14-20\\_Marittimo](https://unige.it/ricerca/prog_euint/vetrina14-20_Marittimo)

<https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/projects/hrov-arch.html>

Travail réalisé dans le cadre du projet **SICOMARPLUS**,  
financé par le Programme de coopération  
Italie-France Maritime 2014-2020

## **SICOMARPLUS Tâche T2.2.1**

# Rapport méthodologique sur l'utilisation des véhicules autonomes pour la surveillance environnementale

**VERSION FINALE 5.0 du 31/01/2022**

**Coudray S.<sup>1</sup>, Brandini C.<sup>2</sup>, Taddei S.<sup>2</sup>, Doronzo B.<sup>2</sup>, Lapucci C.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>**IFREMER La Seyne Sur Mer (France)**

<sup>2</sup>**LAMMA/Firenze e Livorno (Italia)**



# SOMMAIRE

## Introduction

### 1. Bref historique sur le développement des véhicules sous-marins autonomes

### 2. Automatisation des interventions sous-marines et en surface

### 3. Revue (non exhaustive) des engins autonomes existants en France et en Italie

#### 3.1 Robots sous-marins opérationnels

- ROV Semi-autonomes
- AUV et Gliders
- Mini-robots sous-marins

#### 3.2 Robots de surface opérationnels

- Le Waveglider de Liquid-Robotics
- Le voilier automatisé VAIMOS (Ifremer-ENSTA)
- Le drone de prélèvements SPEEDO (Ifremer)

#### 3.3 Quelques engins expérimentaux dans le monde

#### 3.4 Flottes de drones

#### 3.5 Bouées de mesure mobiles automatisées

### 4. Coopération transfrontalière pour l'acquisition d'un Waveglider

### 5. Perspectives d'utilisation des robots autonomes: cadre méthodologique

#### 5.1 Déploiement opérationnel du Waveglider

- Déploiement propriétaire
- Déploiement avec service fournisseur

#### 5.2 Les défis de la maintenance technique d'un engin autonome

- Logistique nécessaire
- Compétences à développer et entretenir
- Usure et entretien
- Vieillesse technologique et mises à niveau
- Calibrations
- Spécificités de maintenance propres au Waveglider

### 6. La gestion des mesures scientifiques

- Acquisition
- Pré-traitement
- Stockage interne
- Diffusion des informations en temps-réel
- Affichage des informations diffusées
- Archivage des informations reçues à terre et des données mesurées

## **7. Développements technologiques en cours**

**7.1 Nouveau capteur HAP avec bi-fluorimétrie (Université de Toulon-ALSEAMAR)**

**7.2 Contrat d'étude SICOMARPLUS pour capteur fluorimétrie sur Mini-robot.**

**7.3 Nouveaux développements à court-terme**

## **8. Réseaux et plateformes mobilisables en cas d'incident transfrontalier**

**8.1 Cadre normatif**

**8.2 Systèmes disponibles en 2020**

## **Conclusion**

## **Annexes**



## Introduction

La Tâche 2 du projet INTERREGV-MARITTIMO SICOMARPLUS est dédiée à l'intégration et à l'implémentation des système de surveillance environnementale à base de plateformes mobiles.

La zone marine de coopération du projet correspond au Sanctuaire Pelagos, principale **Aire Spécialement Protégée d'Importance Méditerranéenne** (ASPIM), caractérisée par un important patrimoine naturel et soumise à une forte pression anthropique. Le projet SICOMARLUS vise notamment à l'amélioration de la sécurité de la navigation dans l'espace maritime transfrontalier, fortement menacé ces dernières années par l'augmentation du trafic de marchandises, surtout des marchandises dangereuses, et du nombre de passagers qui franchissent la Méditerranée pour des raisons d'emploi et de tourisme nautique ou des croisières. La réduction des risques passe par une amélioration des systèmes de prévision (météo, modèles de circulation), la pérennisation des systèmes de surveillance (radars HF, systèmes de sécurité en mer) et la formation des personnels intervenant dans les zones maritimes dangereuses.

L'utilisation de plateformes mobiles de mesures est un élément important du dispositif de surveillance autant pour parvenir à une bonne connaissance de l'état de référence dans les secteurs à risque que pour fournir des informations pertinentes en cas d'incident majeur susceptible de provoquer une pollution sur le littoral dont la localisation exacte et l'étendue ne peuvent être déterminés à l'avance.

Dans ce cadre, nous allons tenter dans un premier temps de recenser les divers systèmes de mesure autonomes actuellement développés dans le monde et plus particulièrement disponibles en Europe et en Mer Méditerranée en 2020. La seconde partie du document se focalisera plus particulièrement sur l'engin Waveglider et les aspects méthodologiques relatifs à cet outil ainsi qu'aux mini-robots en phase d'expansion pour la décennie à venir.

# 1. Bref historique du développement des véhicules sous-marins autonomes

Le premier robot sous-marin autonome au monde fut le SPURV, développé en 1957 par l'Université de Washington pour le compte de la marine américaine afin d'étudier les transmissions acoustiques en mer. Dix plus tard, IFREMER développait le premier robot civil opérationnel profond d'observation « l'épaulard » qui fut mis en exploitation de 1980 à 1990: guidé par commandes acoustiques sur un champ de balises géolocalisées, il permettait d'effectuer des mesures hydrologiques (T°, salinité) et de réaliser des photographies haute résolution ainsi que des relevés bathymétriques jusqu'à 6000m de profondeur.

Dans la période 1990-2010, la génération suivante était essentiellement composée de sous-marins habités<sup>1</sup> permettant l'exploration visuelle des grands-fonds et de robots asservis et télécommandés depuis la surface. Ils disposaient tous de capacités de mesures hydrologiques et d'observation par caméras avec enregistreurs numériques. Certains de ces robots sont toujours exploités de manière opérationnelle<sup>2</sup>.

A partir des années 2000-2005, des engins entièrement autonomes et programmables (AUV) sont développés pour effectuer principalement des missions d'exploration côtières jusqu'à une profondeur de 2000 à 3000 mètres. Actuellement des projets d'AUV 6000 mètres sont en cours d'élaboration ou disponibles à la vente en Norvège (Kongsberg HuginSuperior), en France (Ifremer-ECA Coral), aux USA (Teledyne-Gavia Raptor, REMUS6000), au Japon (JAMSTEC Urashima-REMUS) etc.

Depuis 2010, des engins mixtes (télé-opérés et autonomes) commencent également à voir le jour. Il s'agit d'engins pouvant être successivement télécommandés puis libérés de leur lien pour fonctionner comme un AUV sur des zones chantier de dimensions réduites. Le premier fut le NEREUS du Woods Hole Institution aux USA (2006-2014) ayant plongé à plusieurs reprises jusqu'à 10000 mètres de profondeur dans la Fosse des Mariannes avant d'imploser accidentellement. D'autres engins de ce type ont ensuite été développés pour des profondeurs de 1500 à 3000m: projet HROV-Arch 2011-2013 de l'Université de Brême en Allemagne, HROV Icefin de l'université de Géorgie USA 2014 destiné au monitoring de l'Antarctique le HROV Ariane d'Ifremer depuis 2015, principalement utilisé pour l'exploration des canyons méditerranéen.

Parallèlement à ces engins propulsés, l'usage des gliders, se déplaçant par modification de la flottabilité et déplacement d'une masse interne, s'est généralisé pour la surveillance de radiales très côtières. En marge des gliders classiques, l'invention par Liquid-Robotics (USA) du Waveglider de surface à propulsion mécanique va permettre de développer le concept de « mission autonome de très longue durée ».

---

<sup>1</sup> [https://wwz.ifremer.fr/grands\\_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-sous-marins/Liste-complete](https://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-sous-marins/Liste-complete)

<sup>2</sup> [https://wwz.ifremer.fr/grands\\_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-robots/Robots-dans-le-monde](https://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/Les-moyens/Les-engins/Les-robots/Robots-dans-le-monde)

En 2020, le parc mondial d'engins autonomes continue à se diversifier avec notamment la mise en œuvre d'AUV très profonds allant jusqu'à 6000 mètres et la mise en service expérimentale de robots de surface de toutes tailles (ASV), qui commencent maintenant à être utilisés en collaboration avec des drones aériens et dans des flottilles autonomes (projets encore expérimentaux).

## **2. Automatisation des interventions sous-marines et de surface**

Pour les opérations sous-marines d'envergure il a toujours été nécessaire jusqu'à une période récente d'être physiquement présent en mer afin d'assurer les opérations de déploiement et de contrôle permanent des engins effectuant des tâches télé-opérées ou semi-autonomes avec souvent une logistique assez lourde installée sur un navire de surface.

Depuis l'apparition des gliders, la présence en mer a pu être réduite aux opérations de mise à l'eau et de récupération de l'engin à l'aide d'embarcations légères. Cela ne concerne en général que des missions simples de surveys d'environ un mois pour les gliders classiques opérant entre 100 et 600 mètres.

Pour effectuer des mesures de surface, les engins de type ASV ou Waveglider, disposent en plus de moyens électroniques de navigation autonomes et d'un système anti-collision AIS autorisant des missions plus longues pouvant aller jusqu'à 2 ou 3 mois, voire plus suivant le mode de propulsion.

Sur ces véhicules, l'automatisation des tâches est bien souvent limitée à la navigation et au déclenchement d'appareils de mesures le long de trajectoires prédéfinies. La mesure est alors enregistrée à haute fréquence dans l'engin pour être exploitée lors de sa récupération et diffusée dans le même temps à basse fréquence en surface au moyen d'une liaison satellitaire de type IRIDIUM en pleine mer ou de type GSM en opération côtière. Dans tous les cas, un contrôle humain à terre doit être assuré 24 heures sur 24 pour vérifier le bon fonctionnement de l'engin et assurer son suivi opérationnel en toute sécurité. Une modification de mission en cours de survey est toujours possible grâce à la transmission de nouvelles commandes par connexion satellitaire.

Récemment des drones ont également été testés pour le recueil d'échantillons en mer (Ifremer) et l'analyse in-situ (MBARI, USA). Ces développements sont en cours de transfert opérationnel. Ils nécessitent une technologie performante afin de respecter les protocoles déjà établis lors des interventions humaines mais leur généralisation à moyen terme est probable dès lors que le rapport coût/performance/fiabilité sera meilleur que celui d'une intervention spécifique sur navire en mer.

### 3. Revue (non exhaustive) des engins autonomes existants en France et Italie

#### 3.1 Robots sous-marins opérationnels

##### ROV Semi-autonomes

Le ROV Victor6000 mis en service par IFREMER en 1998 était un engin entièrement télé-opéré depuis la surface. Il a été complété en 2016 par le ROV Hybride ARIANE disposant de sa propre source d'énergie sous la forme de batteries Lithium-ion.

« L'unique lien vers la surface est la fibre optique de communication. Cet engin permet des plongées, dites à la journée, jusqu'à des immersions de 2500 mètres, pour des missions d'intervention, de prélèvement, d'inspection ou de cartographie optique et acoustique.

Son architecture propulsive et ses capteurs de navigation lui autorisent de travailler sur tout type de fond, y compris des zones très accidentées comme les canyons. Équipé de caméras HD et d'un appareil photo numérique orientable, l'engin Ariane peut effectuer des inspections optiques de haute qualité et réaliser des photogrammes(ou cartographie optique 3D) haute résolution. A ce jour, deux configurations de charges utiles sont proposées : 1/ configuration « exploration & prélèvement » intégrant des bras télémanipulateurs (5 et 7 fonctions), un panier, un appareil photo numérique orientable et des outillages de prélèvement (aspirateur à faune); 2/ configuration « cartographie » intégrant un sondeur multifaisceaux et l'appareil photo numérique orientable.

Le HROV Ariane peut être déployé sur des navires océanographiques de la Flotte côtière notamment L'Europe et L'Antea en Mer Méditerranée. Il permet de répondre aux demandes pour lesquelles les engins d'intervention profonds existants (*Nautile*, *Victor 6000*) ne sont pas forcément adaptés en raison de leur mise en œuvre plus complexe à partir de navires hauturiers, de leur programmation à long terme et de leur coût.

##### AUV entièrement autonomes

IFREMER dispose de deux engins autonomes dénommés *Aster<sup>x</sup>* et *Idef<sup>f</sup>*.

« Ce sont des véhicules sous-marins autonomes dédiés à la reconnaissance scientifique pour les plateaux et marges continentaux jusqu'à 2850 mètres de profondeur. Ils réalisent des plongées sans lien physique avec le navire en surface et sans contrôle par opérateur. D'une taille moyenne, ces véhicules peuvent mettre en œuvre des charges utiles scientifiques sur des profils allant jusqu'à 100 kilomètres de longueur. Ils disposent d'un catalogue de charges utiles, telles que des sondeurs multifaisceaux ou de sédiments, des profileurs de courant, CTD, magnétomètres et d'autres équipements embarqués configurables grâce à des interfaces adaptables. »

Ce type d'AUV semi profond est essentiellement dédié à l'étude des fonds marins ou de la colonne d'eau pour des objectifs scientifiques divers, ainsi qu'à la recherche de cibles scientifiques, d'épaves ou d'objets. Leur mise en œuvre sur des navires côtiers permet une mobilisation rapide à un coût raisonnable.

Sur le marché des mini-AUV (LAUV pour Light Autonomous Underwater Vehicle) on peut citer en France les systèmes COMET de RTSYS dédiés entre autres à l'acoustique sous-marine. Les fournisseurs étrangers sont nombreux dans ce segment à proposer des produits dédiés aux opérations de défense ou civiles avec des engins de tailles et capacités diverses; parmi les différents constructeurs on peut mentionner LSTS au Portugal et OCEANSCAN aux USA.

### Mini-robots sous-marins

Récemment, le centre IFREMER de Sète (UMR MARBEC) a fait l'acquisition d'un mini-robot sous-marin entièrement autonome, conçu et fabriqué par la société française NOTILOPLUS basée à Marseille. Dans sa version originelle il ne dispose que d'une caméra embarquée et d'un système de suivi de plongeur pour un coût inférieur à 5000 euros. La société NOTILOPLUS vient de conclure en 2019 un important marché avec la compagnie CMA-CGM en région Sud-PACA pour la livraison d'une flotte de robots d'inspection autonomes<sup>3</sup>.

Le robot MARBEC servira au monitoring expérimental des lignes de pêche en Corse (projet FEAMP-GENREC) pour le contrôle de l'activité des prédateurs notamment les espadons autour d'une palangre longue de plusieurs kilomètres.

Bien qu'il existe de nombreux mini-ROV à câble sur le marché, les mini-robots autonomes restent peu nombreux: on peut citer le FIFISH V6 de QYSEA robot multidirectionnel équipé de 6 propulseurs lui permettant d'évoluer à la manière d'un ROV classique, dont les premiers tests ont été conduits à l'Aquarium du Grau du Roi.

Un autre robot de fabrication française de type mini-ROV télécommandé par câble a été également testé en 2018 au Sea-Aquarium du Grau-du-Roi en région Occitanie. Proposé par la Start-up IOS, son intérêt est de pouvoir connecter facilement divers modules configurables permettant de réaliser des missions de monitoring variées<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=U1LQGosgiSo>

<sup>4</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=DeDh2HXPCw>

## 3.2 Robots de surface opérationnels

### Le Waveglider de Liquid-Robotics (LAMMA-IFREMER)

Le concept innovant du Waveglider repose sur l'utilisation de l'énergie mécanique de la houle, permettant ainsi à l'engin de s'affranchir des contraintes liées à la propulsion. Mis au point en 2003, il a progressivement été amélioré par la société américaine Liquid-Robotics qui en détient le brevet. Il n'y a pas d'autre système directement concurrent pour ce type de technologie permettant des missions autonomes de très longue durée. L'engin est contrôlé depuis la terre via une interface Internet, soit directement par son propriétaire, soit en faisant appel au service proposé par Liquid-Robotics dans son centre de contrôle californien, opérationnel 24 heures sur 24.

L'instrumentation scientifique de base permet la navigation autonome et la mesure de paramètres hydrologiques. Il peut être équipé en option d'un fluorimètre et d'un courantomètre doppler. Il est possible de lui adjoindre une « laisse » flexible remorquée longue de plusieurs mètres, permettant de déporter un lot supplémentaire d'instruments (acoustique par exemple).

### Le voilier automatisé VAIMOS (IFREMER-ENSTA)

Ce engin a été conçu initialement en 2012 comme un projet d'école pour assurer le guidage automatique d'un petit voilier de type « dériveur » à l'aide d'une propulsion douce (voiles + énergie solaire) permettant des missions de longue durée sans carburant dans des régions peu ensoleillées. C'est un navire de type dériveur de 3m65 de long pesant 300kg. Il peut être programmé pour quadriller des zones de plusieurs kilomètres. Les instruments embarqués sont comparables à ceux du Waveglider et alimentés par batteries solaires.

Le voilier a participé à différents essais et courses en pleine mer. Il a ainsi parcouru plus de 100 kilomètres à la pointe de Bretagne. S'agissant d'un outil-conceptuel il n'a pas eu d'utilisation pleinement opérationnelle notamment en raison des problèmes de sécurité maritime que peut poser l'utilisation d'un engin non habité et peu manœuvrant en zone côtière<sup>5</sup>.

### Le drone de prélèvements SPEEDO (IFREMER)

Développé pour faciliter les prélèvements destinés au monitoring côtier (initialement Directive Cadre sur l'Eau), le drone SPEEDO répond à un cahier des charges précis :

- se déplacer de manière automatique depuis la plage jusqu'au point de prélèvement à au maximum 500mètres de la côte.
- effectuer des mesures hydrologiques en sub-surface
- collecter des échantillons d'eau avec une cadence prédéfinie, suivant un protocole rigoureux et systématique.

Le robot dispose d'une propulsion électrique non-polluante branchée sur une batterie rechargeable permettant une autonomie de quelques heures. Il pèse moins de 20kg avec un tirant d'eau très faible de 10 cm.

La phase d'essais a débuté en 2016 et se terminera en 2019 par plusieurs missions opérationnelles sur la côte atlantique<sup>6</sup>.

### 3.3 Quelques engins expérimentaux dans le monde

Poursuivant l'essor des drones aériens, beaucoup de projets sont actuellement en cours pour la réalisation de drones sous-marins destinés à des utilisations très variées. Dans ce domaine, la protection de l'environnement suscite de nombreuses actions initiées bien souvent par des écoles et des universités, et débouchant souvent sur des projets de robotisation de tâches en milieu marin.

Parmi tous les projets ayant une certaine visibilité sur internet nous pouvons citer quelques exemples :

Le robot MOS/AUV développé par l'université de Okayama au Japon permettant, avec un volume réduit, d'évoluer de manière autonome en milieu contaminé. Disposant d'un système de vision intelligent, il est capable de prendre des décisions automatiques sans intervention humaine. Actuellement testé en piscine il pourra disposer à l'avenir d'une propulsion sur batterie rechargeable par induction.

Le drone marin Larval-Bot développé par l'université australienne de Queensland : doté d'une caméra intelligente il permet non seulement de surveiller de manière autonome la dégradation progressive de la grande barrière de corail, mais aussi d'effectuer des missions de repeuplement larvaire à l'aide d'un disperseur connecté par une laisse sous la surface.

Le robot marin THOMAS développé par le NOC en Angleterre : ressemblant à un aéroglisseur, ce navire autonome de type catamaran léger permet d'explorer les « hotspot » de biodiversité. Testé en 2016 dans les Scilly islands, il a permis de mesurer les paramètres de front des couches océaniques en bordure du littoral.

Le laboratoire automatique du MBARI (USA) a été développé spécifiquement pour la collecte d'échantillons en vue d'analyses ADN. Il est embarqué sur un AUV classique de haute-mer (Long-range AUV) et peut réaliser jusqu'à 60 échantillons durant une période d'environ 20 jours pour des profondeurs allant de 0 à 300mètres. Cet engin a effectué sa première mission opérationnelle en 2018.

---

6

<https://www.youtube.com/watch?v=egrV-JLrL1s>  
[https://wwz.ifremer.fr/content/download/91762/file/4\\_11\\_15\\_Speedoo.pdf](https://wwz.ifremer.fr/content/download/91762/file/4_11_15_Speedoo.pdf)

Le drone marin Sphyrna de Seaproven (Mayenne, France) : développement d'un catamaran automatisé pouvant accueillir toute sorte d'instrumentation destinée au recueil de paramètres in-situ en haute-mer et bénéficiant d'un financement par l'Agence Spatiale Européenne pour la calibration des données satellitaires.

Le catamaran Squirtle de l'université de Coimbra au Portugal : développé en 2013, l'ASV Squirtle est construit sur 2 kayaks et propulsé par deux moteurs à essence. Il a été conçu pour le monitoring d'estuaires et dispose d'un système de guidage visuel automatisé. Il est essentiellement destiné à la réalisation de profils bathymétriques. L'université de Marseille (MIO-PYTHEAS) dispose d'un outil similaire de taille réduite destiné à l'observation des paramètres de la houle de surface.

Le catamaran Energy Observer financé par le laboratoire LITEN du CEA: mis à l'eau en 2017. Bien que piloté par un équipage, cet engin est le premier navire sans voile entièrement autonome en énergie. Long de 30mètres et propulsé à l'hydrogène qu'il est en mesure de fabriquer lui-même, c'est un équivalent du défi « Solar impulse » dans le domaine marin. Il est principalement dédié à des objectifs pédagogiques. Il effectue actuellement une mission de 6 ans sur toutes les mers du globe<sup>7</sup>.

### **3.4 Flottes de drones**

De nombreux développements basés sur l'utilisation de l'Intelligence Artificielle sont aujourd'hui menés dans les laboratoires universitaires pour la supervision automatisée multi-robots. Parmi les premières actions ayant bénéficié d'un financement européen, on peut citer l'utilisation expérimentale de plusieurs AUV dans le cadre des projets MASTIII (2000) et plus récemment en 2016 la mise en œuvre d'une flotte de 7 gliders par l'université de Kiel (DE) et l'Institut GEOMAR pour l'observation des tourbillons au large du Pérou<sup>8</sup>.

Ce type de déploiement encore très coûteux reste expérimental et est surtout projeté dans un avenir proche par des institutions militaires notamment pour des actions de déminage (projet DCNS 2019)<sup>9</sup>.

On peut également citer dans ce registre la collecte de paramètres environnementaux dans un but militaire et civil par la marine américaine avec le déploiement simultané de 50 gliders dans l'Océan Atlantique<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> <http://www.energy-observer.org/en/>

<sup>8</sup> <https://www.hydro-international.com/content/news/glider-swarm-tracks-newborn-eddy>

<sup>9</sup> <https://www.belgium-naval-and-robotics.be/fr/eca-group-systeme-robotise-pour-la-guerre-des-mines-umis/>

<sup>10</sup> <https://navaltoday.com/2018/08/01/us-navy-working-on-breaking-ocean-glider-swarm-record/>



### 3.5 Bouées de mesure mobiles automatisées

En annexe des systèmes mobiles et dans le cadre de la surveillance environnementale il est utile de citer les efforts déployés ces dernières années pour l'installation de bouées semi-mobiles permettant la surveillance d'un point de mesure sur plusieurs mois ou plusieurs années. Pour la France, IFREMER a mis au point le système MAREL, conçu comme un mini-navire ancré entièrement automatisé capable d'embarquer une instrumentation configurable. Ces bouées autonomes sont actuellement déployée à l'embouchure des grands fleuves<sup>11</sup>.

Parmi les systèmes instrumentés mobiles il faut également mentionner le réseau de flotteurs ARGO et Bio-ARGO actuellement déployé dans le monde entier pour le suivi des paramètres physiques et environnementaux de l'océan global. Ce type de flotteur peut également être déployé à la demande par IFREMER pour des mesures locales, sa principale caractéristique étant de dériver au gré des courants en sub-surface et de pouvoir réaliser des mesures par plongées successives dans la totalité de la colonne d'eau<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> [https://wwz.ifremer.fr/rd\\_technologiques/content/download/69627/916529/file/ifremer\\_plate-forme%20\\_MAREL%20\\_v1.0.pdf](https://wwz.ifremer.fr/rd_technologiques/content/download/69627/916529/file/ifremer_plate-forme%20_MAREL%20_v1.0.pdf)

<sup>12</sup> <https://www.odatis-ocean.fr/activites/chantiers-et-projets/programmes-et-projets-de-recherche/bgc-argo/>

## **4. Coopération transfrontalière pour l'acquisition d'un Waveglider**

La nécessité de mettre en place une surveillance progressive des eaux côtières et transfrontalières entre l'Italie et la France, a conduit les différents organismes publics présents dans les cinq régions du programme EU-Marittimo à collaborer depuis 2010 au-travers de différents projets: MOMAR, SICOMAR, IMPACT, SICOMARPLUS, MATRAC etc..

Parallèlement à la mise en place d'un réseau de radars de houle qui permet dorénavant de couvrir une grande partie du secteur côtier Marittimo et de la réalisation de missions diverses permettant d'acquérir une meilleure connaissance du milieu, le LAMMA a décidé avec la participation d'IFREMER d'acquérir un engin de type Waveglider permettant la mesure de paramètres surface/subsurface lors de missions longues. L'engin a été utilisé depuis 2015 sur des missions de courtes durées (moins d'une semaine) puis progressivement sur des missions plus longues d'environ 10 à 15 jours.

Les instruments présents sur l'engin SV3 du LAMMA permettent la mesure des paramètres hydrologiques (température, salinité, oxygène-dissous, turbidité) ainsi que la mesure de fluorescence pour identifier la présence de certaines molécules en mer: pigment Chlorophylle-a, Naphtalène et Phénantrène (HAP) pour les hydrocarbures léger et lourds.

Les mesures sont directement transmises à cadence réduite via une liaison satellitaire pendant toute la durée de la mission. La totalité des mesures haute-fréquence est disponible a posteriori après récupération de l'engin. Celui-ci est également équipé d'un courantomètre doppler (3D-ADCP) enregistrant les variations relatives de la vitesse du courant jusqu'à 60 mètres de profondeur par pas de 1 mètre. Une campagne de calibration des instruments a été menée dans le cadre du projet MARTTIMO-IMPACT en 2019.

## **5. Perspectives d'utilisation des robots autonomes : cadre méthodologique**

### **5.1 Les contraintes de déploiement**

Cet engin autonome peut être déployé à partir d'une embarcation légère ou d'un navire océanographique.

#### Déploiement propriétaire

Voir Notes internes LAMMA.

#### Déploiement avec service fournisseur

Voir Note interne IFREMER « Mise en œuvre du Waveglider sur navire côtier »  
rédacteur : Ch. Mazzara responsable sécurité IFREMER/Toulon.

### **5.2 Les défis de la maintenance technique**

L'effort de maintenance à fournir pour la gestion d'un ou plusieurs engins autonomes est assez conséquent. Plusieurs pays de la communauté européenne possèdent leurs propres centres techniques civils et disposent des moyens logistiques et des compétences techniques nécessaires pour l'entretien et la mise en œuvre de véhicules sous-marins sur le long-terme. La plupart de ces véhicules, télé-opérés ou autonomes, sont dédiés à l'exploration océanographique ou interviennent en support à des missions environnementales. On peut citer entre-autres MARUM-Université de Brême pour l'Allemagne (ROV,AUV et Waveglider depuis 2014), SAMS Institut marin écossais (AUV,Gliders) et NOC Institut national (ROV,AUV,ASV,Gliders) pour le Royaume-uni, FOF-Ifremer/Genavir (ROV,AUV) et DT-INSU (Gliders) à Toulon pour la France, SOCIB Centre d'observation côtière des Baléares en Espagne (Gliders), OGS en Mer Adriatique (Drifters), ISMAR La Spezia en mer Ligure (Glider,Drifters) et LAMMA (Waveglider) en Toscane pour l'Italie.

#### Logistique nécessaire

L'entretien des plate-formes mobiles destinées à être immergées durant une période plus ou moins longue dans l'eau salée, nécessite des infrastructures adaptées pour le démontage/remontage périodique des instrumentations scientifiques et du véhicule lui-même, comprenant un portique pour le déplacement des charges lourdes, des moyens de tests électriques et mécaniques, une piscine d'essai pour l'équilibrage des charges en pleine eau et si possible un accès direct à la mer ou des moyens de transport adaptés permettant d'effectuer des essais techniques préliminaires en petits-fonds.

Pour les engins sous-marins, l'utilisation d'un caisson hyperbare est indispensable pour la vérification préalable de l'étanchéité et de la résistance des éléments immergeables aux profondeurs souhaitées. Quel que soit l'engin, l'usage d'une embarcation légère de type zodiac (6-7m) est souvent nécessaire pour assurer les opérations de sécurisation ou de déploiement du véhicule.

### Compétences à développer et entretenir sur le long terme

Outre les compétences de base en mécanique, électricité et informatique industrielle, il est nécessaire d'acquérir par la pratique au fil du temps des compétences spécifiques en connectique sous-marine et en diagnostic « horizontal » c'est à dire faisant intervenir plusieurs disciplines au même moment. Les tests en laboratoire sont menés à l'aide d'appareils analyseurs et de connectiques spécifiques, extérieurs à l'engin.

Pour les engins propulsés lourds (ROV et AUV profonds), la mise en œuvre à la mer est la plupart du temps gérée par une équipe opérationnelle spécialisée. Lorsque l'engin est autonome, son déploiement est simplifié et les opérations sont en général effectuées directement par l'équipe de maintenance. Dans ce cas en revanche, le pilotage à distance depuis la terre nécessite un apprentissage spécifique et une qualification de « pilote » pour être apte à conduire des missions en toute sécurité et préserver non seulement l'intégrité de l'engin, mais aussi celle de l'environnement matériel ou humain qui l'entoure. Ce suivi de mission nécessite par ailleurs une disponibilité 24 heures sur 24 sous la forme de « quarts de veille » et d'astreintes (nuits, week-end) impliquant un certain nombre de contraintes humaines et juridiques.

Pour citer l'exemple de la DT-INSU en France, l'équipe de maintenance à terre est composée de 4 personnes et gère un parc d'environ une dizaine d'engins dont 3 ou 4 peuvent être opérationnels en mer au même moment. Les compétences techniques sont distribuées sur 3 agents à plein-temps formés à plusieurs disciplines et encadrés par un responsable d'opérations.

Lorsque les moyens personnels sont insuffisants ou que le parc d'engins est plus réduit, il est nécessaire d'avoir recours à des supports techniques à distance (fournisseurs) ainsi qu'à de la sous-traitance externe pour effectuer des diagnostics précis ou réaliser certaines opérations difficiles: démontage de l'engin, modifications, déploiement spécifique, pilotage etc.

Le recours à ces services extérieurs est bien souvent délicat à organiser en raison des compétences pointues demandées, relevant du l'intervention sous-marine civile, qui sont rarement disponibles immédiatement. Par ailleurs, les quelques sociétés capables d'intervenir ont des plannings d'activité en général très tendus. La mobilisation de ces services externes ne peut donc être envisagée que pour des besoins impératifs: panne dure, nécessité de suppléer le personnel permanent, opérations de maintenance exceptionnelles etc. Elle a un coût financier non-négligeable se situant à environ 2000 euros par jour en 2020. Lorsque l'équipe de maintenance a une taille réduite, le diagnostic à distance doit alors être privilégié sous la forme d'extensions de garantie ou de contrats d'assistance spécifiques avec des budgets de fonctionnement annuels adéquats.

### Usure et entretien dit « de routine »

Un engin régulièrement utilisé en mer (plus de 2 missions longues à l'année) vieillit vite et il est indispensable de procéder à un entretien régulier qui peut s'organiser en 3 niveaux d'intervention:

- **Entretien de routine**, devant être organisé systématiquement avant et après une mission comprenant : une phase de « mobilisation » avec des tests électriques et informatiques complets, si possible en piscine ou en darse, à l'aide d'une check-list standardisée et à programmer suffisamment à l'avance pour dégager un temps de réaction raisonnable en cas de panne détectée; une phase de « démobilisation » consistant à effectuer des opérations de nettoyage et de mise en sécurité des équipements scientifiques. Toutes les anomalies constatées en mer et pendant la démobilisation doivent être consignées dans des fiches d'anomalies standardisées. Un planning de maintenance devra ensuite être établi en fonction de la gravité de chaque anomalie. L'entretien de routine comprendra également le démontage/remontage des instruments scientifiques lors des échéances de calibration. Toutes ces opérations doivent être incluses dans un processus rétroactif à la norme ISO9001.
- **Entretien imprévu ou occasionnel**, devant être organisé « au pied-levé » en cas de panne d'un instrument ou touchant un organe du véhicule. Un budget de fonctionnement préventif doit être affecté tous les ans à cette tâche pour prévenir un blocage trop long de l'engin.
- **Entretien exceptionnel** à programmer tous les 2 ans pour un contrôle technique standard des fonctionnalités de navigation et du bon état général de l'engin. Ce contrôle doit être mené suivant une procédure normalisée et les résultats consignés dans un rapport.

### Vieillesse technologique et mises à niveau

Au-delà de cinq années d'utilisation, tout matériel régulièrement utilisé en mer nécessite une révision détaillée incluant bien souvent un démontage complet du véhicule pour changer certaines pièces usées ou abîmées, vérifier l'état des connecteurs, réparer les coups subis à la mer, installer de nouvelles versions de logiciels ou de nouveaux équipements scientifiques. C'est une opération longue impliquant un arrêt de plusieurs mois et qui doit être programmée au moins deux ans à l'avance.

Le vieillissement de certains composants électroniques doit également être pris en compte. Les équipements sont en général vendus avec des MTBF de 5 ou 10 ans, et les modules électroniques utilisés dans des conditions marines souvent sévères (chaleur > 40° en surface, corrosion, dépôts salins, secousses), tombent régulièrement en panne au-delà d'une certaine limite. Par ailleurs, l'obsolescence de certains composants ou des cartes électroniques embarquées est souvent rapide et il est indispensable de prévoir un stock de pièces de rechange sur certains éléments critiques lorsque l'engin est amené à être utilisé régulièrement sur une dizaine d'années.

Lorsque les équipements deviennent obsolètes ou que la garantie n'est plus soutenue par le fournisseur, il est nécessaire d'envisager une remise à niveau de l'engin. Cette « refonte globale » à un surcoût non négligeable qui doit toujours être mis en balance avec le remplacement complet du véhicule par un nouveau de génération plus récente après amortissement de l'investissement initial.

### Calibrations

Certains instruments scientifiques peuvent dériver dans le temps et nécessitent d'être régulièrement recalibrés. C'est le cas des sondes de conductivité-température et de pression (GPCTD) par exemple sur le Waveglider, ainsi que des capteurs d'oxygène dissous et de turbidité qui, selon le nombre de missions effectuées doivent être contrôlés tous les 2 ou 3 ans.

Concernant les fluorimètres construits à base de diodes mono-faisceau, la dérive en longueur d'onde dépend du taux d'activité électrique et, suivant le type d'usage, les calibrations doivent être réalisées annuellement (usage continu) ou de manière aléatoire (usage fractionné), sachant que cette opération peut être longue et coûteuse. Elle doit être conduite une première fois à réception de l'appareil pour chaque canal (CHLA et HAP) puis ensuite sur décision de l'utilisateur en fonction du type de mission à effectuer (grande précision requise ou non).

Lors d'une mission de surveillance effectuée après un incident de trafic maritime et en présence de polluants déjà identifiés, il peut être nécessaire de prévoir une calibration spécifique aux molécules contenues dans les polluants en question car les longueurs d'ondes fluorescées peuvent varier notablement. Cette calibration doit se dérouler dans un laboratoire équipé pour la manipulation des produits dangereux et avec du personnel habilité.

[http://www.jerico-ri.eu/download/filebase/jerico\\_fp7/deliverables/D4\\_2\\_Report%20on%20Calibration%20best%20practices\\_v1-3rev.pdf](http://www.jerico-ri.eu/download/filebase/jerico_fp7/deliverables/D4_2_Report%20on%20Calibration%20best%20practices_v1-3rev.pdf)

Un document de référence est disponible pour la calibration de la GPCTD Seabird ainsi que pour le Fluorimètre C3-Turner HAP+CHLA, ils ont été archivés dans les rapports de suivi du projet SICOMARPLUS.

## 6. La gestion des mesures scientifiques

La gestion des mesures acquises par une plate-forme mobile autonome pose une succession de difficultés techniques relatives à l'acquisition, au pré-traitement, au stockage, à la diffusion, à l'affichage et à l'archivage de la donnée.

Pour l'acquisition, il s'agit d'adapter la fréquence de mesure à la vitesse d'avance de la plate-forme. Celle-ci peut-être comprise entre 0 (point-fixe) et généralement 3 m/s (environ 6 nœuds) pour un AUV propulsé, 1m/s (2 nœuds) pour un Waveglider et seulement 0.25 m/s (0.5 nœud) pour un glider classique. Pour un navire ou un engin rapide ayant une propulsion électrique, la vitesse dite « nominale » permettant l'acquisition de mesures courantométriques est comprise entre 2 et 3 nœuds. Dans le cas du Waveglider, la vitesse d'avance peut varier du simple au double et subir des accélérations/décélérations parasites liées à la propulsion mécanique. Pour un engin propulsé électriquement en subsurface (AUV) la vitesse pourra être beaucoup plus régulière, tandis qu'un ASV, de même que le Waveglider, sera soumis à des mouvements additionnels dus à la houle et au vent.

Dans tous les cas, on peut considérer qu'une acquisition tous les 10 mètres constitue un bon compromis pour assurer une surveillance environnementale précise à petite-échelle. Ce qui donnera une fréquence de mesure maximale de 1/40s (0,025 Hz) pour les gliders classiques, 1/10s (0,1 Hz) pour le Waveglider et environ 1/3s (0,33Hz) pour les engins propulsés.

Suivant la longueur de la mission et le type de trajectoire à parcourir ces fréquences pourront être diminuées d'un facteur 2 à 10. Le pas d'échantillonnage minimal peut effectivement être borné intuitivement à 100 mètres compte-tenu de la résolution actuelle des satellites environnementaux SENTINEL qui est de 300 mètres (rapport nominal de 1 à 3 à maintenir entre mesure satellitaire et mesure in-situ pour assurer une bonne inter-calibration des données).

Le pré-traitement suppose que la mesure avant stockage soit corrigée des biais propres à chaque capteur et des mouvements propres à l'engin lui-même.

- La correction des biais peut être réalisée directement dans l'instrument en figeant des coefficients de calibration dans un fichier d'initialisation chargé au démarrage ou stocké dans la mémoire interne.
- La correction des mouvements du véhicule ne pourra en revanche être effectuée qu'a posteriori par application d'algorithmes spécifiques à chaque engin tenant compte des accélérations subies et de la fréquence d'échantillonnage choisie. Les paramètres gyroscopiques doivent en conséquence être stockés à la même cadence que les données scientifiques, qui comprendront également la pression pour les équipements immergés avec une hauteur de houle variable. La connaissance de la pression atmosphérique moyenne est également nécessaire.

Le stockage interne de toutes les mesures ainsi que de toutes les informations de navigation associées doit être assuré par des mémoires de type SDRAM ou des disques durs sécurisés à l'intérieur de l'engin ayant une capacité suffisante pour conduire une mission de plusieurs jours. Les mémoires actuelles permettent d'enregistrer les mesures hydrologiques à faible encombrement (en terme d'octets) sans contrainte de durée. En revanche pour les mesures courantométriques doppler la durée maximale peut varier de un à quelques mois en fonction du support de stockage utilisé. Pour l'imagerie numérique haute-résolution, très gourmande en nombre d'octets, cette durée est actuellement ramenée à quelques dizaines de jours pour des prises de vues automatisées avec une fréquence nominale de 1/5 secondes. En revanche il n'est toujours pas envisageable en 2020 de stocker des films numériques haute-résolution sur de très longues périodes.

La diffusion des informations en temps-réel ou légèrement différé en cours de mission est absolument nécessaire compte-tenu des coûts importants induits par le déploiement et la gestion des engins autonomes:

- Il est d'abord indispensable de pouvoir vérifier dès le début de la mission si tous les instruments de mesure immergés sont effectivement en état de marche. Ce contrôle doit ensuite être effectué à intervalles réguliers grâce à la gestion d'alarmes prises en compte à terre par un opérateur humain. Les instruments doivent également pouvoir être reconfigurables à tout instant (vitesse d'acquisition, marche/arrêt, réinitialisation) en fonction du lieu, du moment ou des avaries possibles.
- Il est ensuite important durant toute la mission de pouvoir enregistrer à terre un certain nombre de mesures basse-fréquence afin de prévenir tout incident majeur qui pourrait conduire à la perte définitive des données: instrument « grillé », mémoire interne inaccessible, entrée d'eau, panne majeure sur l'engin voire même perte de l'engin dans le cas des gliders sous marins ou des AUV.

Ces deux contraintes obligent à maintenir une connexion satellitaire permanente de débit suffisant afin de rester en contact avec le véhicule en surface pour émettre des commandes et recevoir des données de positionnement et d'état de l'engin lui-même (status + alarmes) ainsi que des ensembles de mesures sous-échantillonnées. Pour les gliders et les AUV, une émission en surface régulière est préconisée: tous les 300m ou toutes les heures par exemple pour un glider classique, 1 fois par jour ou moins pour un AUV suivant les types de mission, et de manière permanente sur un Waveglider ou un ASV pour lesquels les risques de collision en fonction du trafic maritime sont importants et nécessitent une surveillance quasi-continue à terre.

L'affichage des informations diffusées, des alarmes, status et commandes émises est de nos jours réalisé de préférence grâce à une interface WEB accessible en continu depuis n'importe quel poste de travail dans le monde connecté à Internet. De manière optionnelle, il est également possible maintenant de contrôler en temps-réel la mesure déjà pré-traitée sur des graphes régulièrement mis à jour à chaque connexion satellitaire. Durant une mission très côtière et pour des distances inférieures à 5 milles de la terre, il sera possible de coupler la liaison satellitaire avec une liaison GSM permettant l'envoi périodique de messages déjà formatés et lisibles avec une fréquence nominale d'environ 1/10 secondes.



L'archivage des informations reçues et des données mesurées est la dernière étape qui sera réalisée de préférence à terre:

- de manière continue durant la mission pour les paramètres « affichables » à basse-fréquence déjà décrits et transmis par connexion satellitaire,
- a posteriori pour l'ensemble des mesures haute-fréquence stockées dans les mémoires de chaque instrument ainsi que celle de l'engin.

Cette étape est cruciale compte-tenu du coût global d'une opération en mer d'une durée minimale de plusieurs jours qui se chiffre en général en dizaines de milliers d'euros (temps personnel et amortissement du matériel compris), et des difficultés de mobilisation et de planification que pose ce type de mission autonome directement dépendante des conditions météo, sans compter les coûts de maintenance associés (usure, accidents, avaries).

Le déchargement des mesures doit donc respecter un protocole rigoureux et systématique à la fin de chaque mission pour éviter les pertes de données. Il doit s'accompagner d'un rapport de fin de mission décrivant le lieu, le contexte et les objectifs de la mission, ainsi que les trajectoires, les conditions de réalisation de la mesure et les résultats obtenus jour après jour. Les données doivent être fournies sous forme de fichiers numériques avec un « étiquetage » codifié permettant un stockage rationnel à long-terme. Si les données doivent être réutilisées à moyen terme par d'autres équipes scientifiques il est nécessaire de respecter une procédure de type ISO9001 incluant l'utilisation de formats prédéfinis et standardisés au niveau européen. Le stockage à long-terme doit ensuite être pris en charge par un centre de données labellisé et sécurisé, avec un droit d'accès spécifique à chaque type de donnée et surtout un système de sauvegarde redondant et un service de documentation associé.

Pour IFREMER, la conservation des données océanographiques est assurée par le SISMER au centre de Brest dans une base nommée CORIOLIS prenant en compte un certain nombre de plate-formes mobiles: les flotteurs ARGO, les gliders, les marques de mammifères marins, les ferrybox, les drifters lagrangiens. La base CORIOLIS est associée à un système documentaire à deux niveaux: ARCHIMER (pour le stockage des documents) + SEXTANT (pour leur descriptif)<sup>13</sup>.

En France, la gestion des données plus élaborées à destination des utilisateurs finaux est fédérée au niveau national depuis 2016 dans le Pôle ODATIS avec pour objectif général de « faciliter l'utilisation à long-terme des données d'observations réalisées dans l'océan à partir de mesures *in situ* et de télédétection »<sup>14</sup>.

De même, la gestion matérielle des données littorales et côtières est assurée de manière standardisée depuis 2016 par une Infrastructure de recherche pluri-instituts dénommée ILICO, opérée conjointement par IFREMER et le CNRS et organisée en plusieurs réseaux. Cette infrastructure ne prend pas en compte actuellement les plate-formes mobiles<sup>15</sup>.

<sup>13</sup> <http://www.coriolis.eu.org/>

<sup>14</sup> <https://www.odatis-ocean.fr/>

<sup>15</sup> <https://www.ir-ilico.fr/L-infrastructure-de-recherche>

La gestion des activités « gliders » est fédérée au niveau mondial dans un groupe dénommé EGO comprenant actuellement 42 membres (instituts ou unités de recherche).  
<https://www.ego-network.org/dokuwiki/doku.php?id=public:members>

Une infrastructure européenne a récemment vu le jour dans le cadre des projets H2020 pour regrouper les centres de données océanographiques à travers un portail internet unique afin de standardiser et faciliter l'accès aux données. Le souci premier du service « Metadata » est l'interopérabilité; il offre la possibilité de renseigner les campagnes océanographiques, de donner accès aux observatoires de mesures et de présenter les projets en cours au niveau européen.  
<https://www.seadatanet.org>

## 7. Développements technologiques en cours

Des avancées technologiques significatives ont été réalisées ces dernières années autour des drones, surtout aériens mais aussi terrestres et sous-marins. Elles passent par la miniaturisation des composants mécaniques et des modules électroniques associés, de plus en plus standardisés (caméras, actionneurs, capteurs) ainsi que par une démocratisation des techniques d'intelligence artificielle mises au point il y a plus de 20 ans, mais réellement opérationnelles depuis peu. Ces engins sont destinés à être largement utilisés dans les années qui viennent.

Dans le secteur sous-marin où les conditions d'exploitation sont plus difficiles, leur diffusion est plus lente notamment en raison de l'absence de contrôle visuel, ou encore des problèmes de résistance des matériaux à la pression et des phénomènes de corrosion. Jusqu'à une époque récente, et à quelques exceptions près, les engins autonomes civils ont principalement été financés par l'industrie pétrolière ou les grands Instituts de recherche océanographiques. La plupart des engins autonomes de surface (ASV) développés par les Instituts eux-mêmes ou par des entreprises privées œuvrant dans le secteur marin sont multi-capteurs mais encore souvent encombrants avec un rayon d'action limité par leur système de propulsion, excepté le Waveglider. Disponibles à la vente ou en location, les ASV permettent néanmoins des surveys occasionnels et peuvent être mis en œuvre sur des grilles d'observations locales (panaches en mer, portions de littoral, radiale côte-large) lorsqu'on dispose du budget nécessaire. Ils sont complémentaires des stations d'observations fixes ou des « surveys » gliders organisés sur le long-terme avec en général des trajectoires prédéfinies et récurrentes.

Depuis 2010, le développement exponentiel des drones aériens télécommandés a permis d'avoir des composants standard à un coût accessible et des mini-drones sous-marins autonomes sont apparus dans le secteur des loisirs sur la base de technologies similaires pour des budgets inférieurs à 8000 euros. Progressivement, des versions professionnelles plus abouties, commencent à voir le jour avec une palette d'applications diverses dans le secteur de l'énergie, du transport maritime, de l'hydraulique etc.

Toutefois il existe encore peu de capteurs scientifiques environnementaux directement embarquables sur ce type de robots sans un effort d'intégration important, souvent rendu complexe en raison du manque d'information sur les protocoles de communication et du conditionnement spécifique de ces instruments.

## 7.1 Nouveau capteur de mesure des Hydrocarbures Aromatisés Polycycliques (IPA/HPA) avec bi-fluorimétrie

Concernant la mesure par fluorescence des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), plusieurs systèmes immergeables existent sur le marché. Ils sont soit totalement autonomes pour une utilisation manuelle et dénommés fluorimètres de terrain: on peut citer les sondes Seabird, Aquaref, YSI, AMIScience, Sea&SunTechnology, etc; soit intégrables dans un véhicule ou un système embarqué et alors appelés « embedded sensor » en anglais. C'est le cas en particulier des instruments Turner-Design, largement diffusés en milieu marin et équipant le Waveglider ainsi que des sondes Wetstar de Seabird Electronics équipant le parc de Gliders DT-INSU en France.

Par ailleurs, l'Université de Marseille / Institut MIO a conçu et fait développer récemment par la société ALSEAMAR un capteur miniaturisé dénommé « MiniFluo UV » permettant de caractériser les composés dissous fluorescents sur 2 longueurs d'ondes caractéristiques, représentatives de la fraction soluble de plusieurs molécules dérivées du pétrole en mer: Naphtalène, Phénanthrène, Tryptophane, Pyrène, Fluorène, et Carbaryl (pesticides). Ce capteur dénommé MiniFluo-UV est peu consommateur en énergie (400mW) et destiné à équiper le glider français SeaExplorer distribué par la société ALSEAMAR (financement FUI, DGE, ANR et EU)<sup>16</sup>. La période de mesure type est de 600ms avec une précision de 0.01 ug/L pour les composés les plus courants. L'expérience menée à l'échelle pilote au polludrome du Cèdre en 2017 a permis de démontrer l'utilité spécifique de ce capteur pour la détection des différents types de pétrole<sup>17</sup>.

## 7.2 Contrat d'étude SICOMARPLUS pour fluorimétrie sur mini-robot

Forts de ce constat, il nous a semblé opportun d'étudier plus avant la possibilité de disposer d'un module logiciel générique permettant d'intégrer aisément un capteur HAP sur plusieurs type d'engins et capable de transmettre ses informations de manière autonome via une communication satellitaire et/ou GSM à terre.

C'est le sens du contrat d'étude passé avec l'Université de Montpellier qui a permis d'affiner les solutions disponibles et d'effectuer quelques développements nécessaires en 2020. Le LIRMM (Laboratoire de Robotique) a conduit cette étude pour évaluer l'utilisation d'un fluorimètre sur un mini-robot autonome plus flexible, ayant un rayon d'action réduit et une durée limitée d'utilisation de quelques heures

Ce type d'engin low-cost, pourrait être déployé à partir d'un zodiac et autoriserait le monitoring temps-réel rapide du milieu littoral dans des zones très côtières en complément de la surveillance à plus long-terme pouvant être réalisée au large par des engins plus coûteux actuellement disponibles: Waveglider (LAMMA), système remorqué C3-Turner CRAY+Profileur vertical d'IFREMER, ou Glider ALSEAMAR+MiniFluo-UV pour l'Institut MIO.

<sup>16</sup> <https://www.alseamar-alcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>

<sup>17</sup> [https://www.spppi-paca.org/\\_depot\\_sppi/\\_depot\\_arko/articles/276/presentation-mio-c.-guigue\\_doc.pdf](https://www.spppi-paca.org/_depot_sppi/_depot_arko/articles/276/presentation-mio-c.-guigue_doc.pdf)

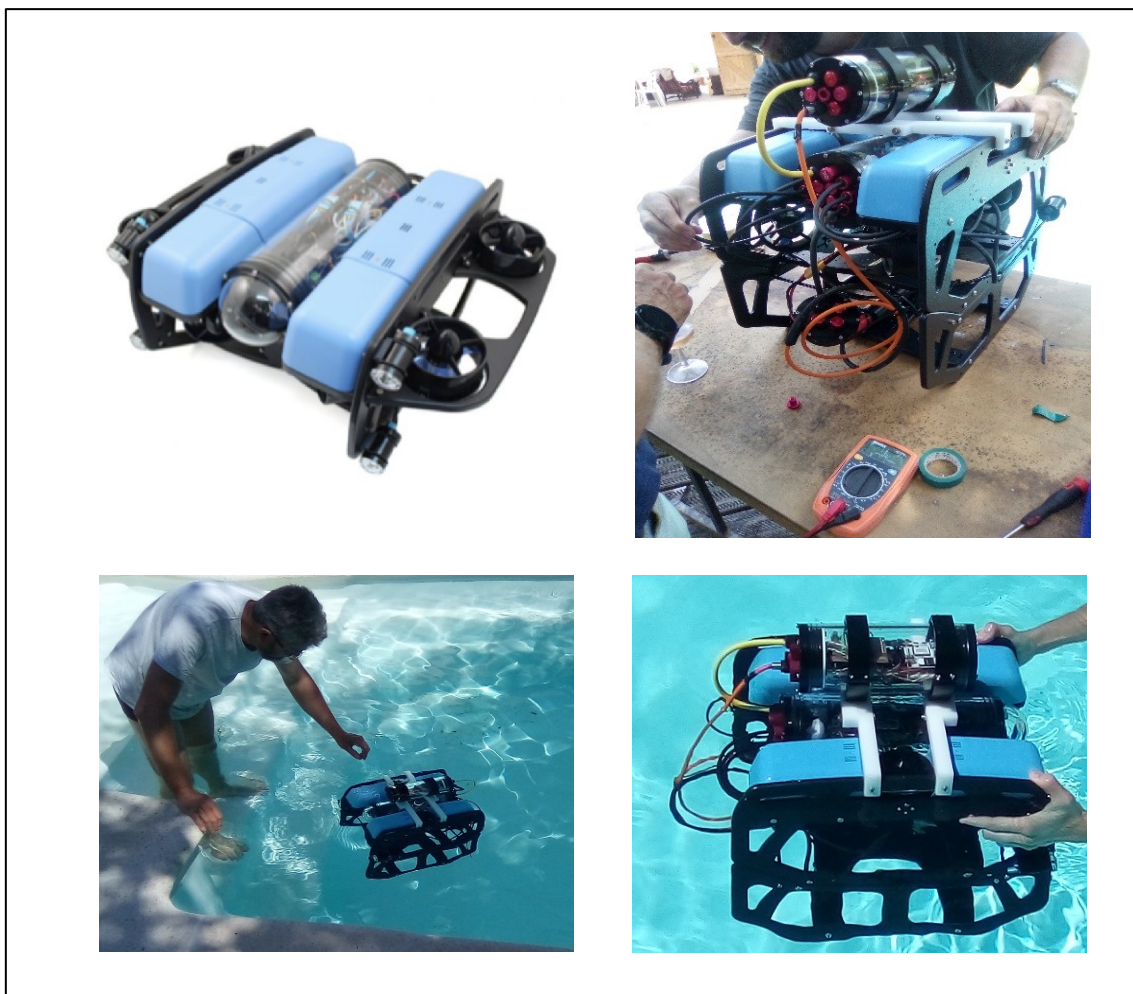


Figure 1. Essais en piscine du mini-robot BlueROV-Kit avec capteur environnemental

Un second projet Marittimo (MATRAC)<sup>18</sup>, destiné à la surveillance des ports et dans lequel IFREMER est déjà partenaire avec le laboratoire de géophysique de l'Université de Gênes, a permis de tester en 2019 un logiciel de supervision expérimental dédié à la mesure adaptative, qui pourrait être utilisé en connexion avec le mini-robot dans un futur projet.

<sup>18</sup> <http://interreg-maritime.eu/fr/web/matracacp/projet>

### 7.3 Futurs développements à court-terme

Les applications environnementales des drones sont de plus en plus nombreuses et seront destinées pour une part à compléter sur le terrain l'observation spatiale haute-résolution. (Cf. Note Rivollet 2014, IFREMER-CAPTIVEN). Ces drones aujourd'hui encore souvent télécommandés sont progressivement dotés de capacités dites « intelligentes » leur conférant de plus en plus d'autonomie.

A l'aube de la prochaine décennie, la robotique intelligente fait l'objet d'une attention particulière dans les programmes de formation des futurs étudiants aussi bien au niveau national en France que local dans le Var avec le Pôle de la Mer<sup>19</sup>, dans les Alpes-Maritimes avec le Pôle technologique de Sophia-Antipolis<sup>20</sup>, en Ligurie et Toscane avec les diverses universités et centres d'enseignements maritimes liés aux ports de Gênes, La Spezia et Livourne, sans oublier la présence technique du NURC, le centre de recherche de l'Otan à la Spezia<sup>21</sup>.

La capacité d'un robot à prendre par lui-même des décisions en milieu isolé (grande-profondeur, milieu contaminé etc.) constitue un objectif essentiel pour les robots sous-marin de demain. Même si les techniques commencent à mûrir en milieu terrestre il faudra encore un certain temps pour aller au-delà des tâches simples relevant de la mise en sécurité de l'engin ou de la modification d'un parcours préprogrammé. En associant robotique traditionnelle et intelligence-artificielle, la démarche actuelle pour rendre les véhicules sous-marins plus intelligents se focalise sur deux points essentiels: « acquisition de connaissances sur l'environnement immédiat » et « élaboration de décisions pour agir et se déplacer de manière totalement autonome ». L'utilisation de superviseurs adaptatifs, externes via une communication en surface pour les ASV ou interne aux calculateurs embarqués pour les AUV, anticipe déjà la capacité à pouvoir réaliser une mesure dite « intelligente » en optimisant les temps de parcours et l'énergie dépensée, mais un des verrous essentiels à ces technologies en milieu sous-marin reste aujourd'hui l'autonomie de propulsion.

En parallèle, des progrès sont également réalisés en mécatronique pour augmenter les capacités de l'engin en terme de souplesse des mouvements ou d'habileté. On peut rapidement citer des développements opérationnels concernant des systèmes hybrides ou transformables (<https://spectrum.ieee.org/robotics/humanoids/meet-aquanaut-the-underwater-transformer>) ainsi que les développements expérimentaux axés sur le biomimétisme des espèces marines: méduses, tortues, crevettes, poissons, prédateurs etc... la liste est longue.

<sup>19</sup> <https://www.univ-tln.fr/L-Universite-de-Toulon-centre-d-excellence-international-en-robotique.html>

<sup>20</sup> [http://users.polytech.unice.fr/~bilavarn/elec\\_gse.html](http://users.polytech.unice.fr/~bilavarn/elec_gse.html)

<sup>21</sup> [https://www.eu-robotics.net/robotics\\_league/news/press/lights-robots-action-land-and-sea-robots-compete-in-erl-emergency-event.html](https://www.eu-robotics.net/robotics_league/news/press/lights-robots-action-land-and-sea-robots-compete-in-erl-emergency-event.html)

## **8. Réseaux et plateformes mobilisables en cas d'incident transfrontalier**

Face à l'éventualité d'une pollution marine d'envergure transfrontalière, il est utile de rappeler le contexte administratif actuel et d'inventorier rapidement les différentes plateformes mobiles susceptibles d'être mobilisées pour la surveillance environnementale à moyen et long terme.

### **8.1 Cadre normatif (plan POLMAR en FRANCE)**

En France, les interventions d'urgence dans ce domaine sont encadrées par la préfecture régionale et maritime qui décide du déclenchement d'un plan organisateur nommé POLMAR. En dehors des actions de premier secours menées par les services de l'état, le CEDRE et les autorités locales, l'Institut IFREMER peut être sollicité dès l'incident «pour établir une stratégie de surveillance sanitaire et environnementale et participer à l'échantillonnage et à l'organisation du suivi, ce qui doit permettre notamment de définir l'état de référence en amont de la pollution. Dans un premier temps il s'agit d'établir un « échantillonnage initial » qui permet de connaître l'état de référence de la contamination chimique, pouvant être ensuite comparé avec les situations ultérieures de pollution, que ce soit lors de la période de crise ou à différents stades de la restauration de la qualité du milieu. Outre ces échantillonnages pratiqués lors du déclenchement de l'alerte, l'état de référence hors pollution peut être consulté dans les Bases de Données issues des réseaux de surveillance (ROCCH notamment et REPHY) qui pourront être sollicités en vue de fournir des données de base sur des points situés à proximité immédiate ou considérés comme point pouvant servir de référence. L'échantillonnage initial est primordial et doit être réalisé très rapidement. Le suivi de la restauration du milieu qui interviendra dans une phase suivante aura alors deux objectifs : sanitaire et environnemental. Les deux premiers stades sont de courte durée (juste avant et pendant l'arrivée de la pollution sur le littoral) et obligent à procéder rapidement. Dans le dernier stade, après l'arrivée de la pollution, la composante santé publique implique une coopération avec les services sanitaires officiels, pour déterminer les paramètres à observer et leurs modalités d'échantillonnage.»<sup>22</sup>

Côté français, IFREMER doit ainsi établir une stratégie de surveillance valable pour toute la phase de suivi post-accidentelle ainsi que pour l'échantillonnage initial qui précède. Cette stratégie comprend: points de prélèvements, matrice, taxon, nombre d'échantillons, fréquence des prélèvements etc. Par ailleurs, un état de référence des zones littorales en régions transfrontalières Corse et SUD-PACA est déjà disponible grâce aux rapports DCE et DCSMM réalisés et archivés par IFREMER. Des états complémentaires transfrontaliers ont été ou sont en cours de réalisation au titre des projets IMPACT et SICOMARPLUS: rapport sur les contaminations sédimentaires, rapport sur l'accumulation des déchets flottants et la mise en œuvre de plans de houles pour le littoral Corse, rapport d'analyse sur les compositions phytoplanctoniques de référence réalisé pour le projet IMPACT en limite du Parc Naturel du Cap Corse.

---

<sup>22</sup> Cf. document PLAN POLMAR TERRE – Annexe 2, Amouroux, IFREMER 2018

Le contrôle à plus long-terme des zones transfrontalières pourra être effectué relativement à un état de référence général qui sera à établir en 2020 en lien avec un Atlas des zones à risques prévu au projet SICOMARPLUS.

## 8.1 Systèmes disponibles en 2020

Tandis que les opérations d'échantillonnage initial après pollution accidentelle sont menées en urgence et requièrent une mobilisation directe des agents intervenant sur le littoral de manière classique et dans un cadre administratif strict, le suivi de la contamination à court et moyen terme, ayant pour but d'établir le niveau de pollution supplémentaire généré par l'accident au regard des niveaux habituels de contamination, pourra faire appel occasionnellement à des moyens supplémentaires de surveillance afin de contrôler l'évolution de certains paramètres de contamination ou hydrologiques connexes. Parmi les différents systèmes mobilisables durant la phase de suivi à moyen et long-terme nous pouvons citer les plate-formes mobiles ou semi-mobiles autonomes suivantes:

- Bouée semi-autonome de mesure NKE-SMATCH (Température/salinité de surface, + fluorimètre en option).
- Engin semi-autonome Vortex, équipé d'instruments de mesures standard en hydrologie, configurable rapidement avec d'autres instruments (fluorimètre et sondes diverses) et déployable à partir d'un zodiac en secteur côtier pour des missions de quelques jours suivant la disponibilité technique de l'engin.
- Mini-robot d'observation MARBEC/Notiplus autonome équipé d'une caméra GOPRO permettant d'effectuer une surveillance visuelle des espèces vivantes, du fond ou des parois littorales jusqu'à 50m de profondeur, déployable à la journée à partir d'un zodiac à l'aide d'un plongeur pour des missions de quelques heures.
- Engin autonome Waveglider (LAMMA-Ifremer) équipé pour les mesures hydrologiques (T°, salinité, turbidité, oxygène-dissous, CHLA) ainsi que les mesures de contaminants (molécules HAP), déployable sur plusieurs semaines à une distance minimale de 1 mille de la côte et par 20 mètres de fond minimum. Une caméra d'observation vidéo des déchets en subsurface est disponible en option.
- Capteur autonome expérimental de Fluorimétrie financé en partie par les projets SICOMARPLUS et MATRAC, adaptable à la demande sur différents mini-robots et déployable à la journée à partir d'un zodiac à l'aide d'un plongeur pour des missions de quelques heures afin d'effectuer des grilles de mesure en zones contaminées (développement en cours).

Tous ces instruments peuvent être appuyés par l'utilisation à terre de modèles hydrodynamiques 3D permettant d'optimiser leur déploiement et de mieux connaître spatialement les conditions de mer et hydrologiques (Cf. rapport IMPACT sur les modèles hydrologiques ISMAR / CNR-Oristano / LAMMA/ IFREMER / Université de Toulon-Var). Des données satellitaires haute-résolution pourront également être extraites à la demande en provenance des satellites SENTINEL disponibles depuis 2018.

## Conclusion

L'année 2020 se situe dans une période de transition pour la surveillance du milieu marin. Parallèlement aux méthodes de suivi traditionnelles sur points fixes en vigueur depuis 30ans, des nouvelles méthodes d'observation dites « numériques » se développent. Que ce soit à grande échelle pour l'océan global avec l'exploitation des données spatiales ou à l'échelle locale pour le littoral et la bande côtière avec une mesure toujours plus fine et faisant appel à des tâches de plus en plus automatisées.

Ce processus de transformation technologique est déjà en place et, côté français, les orientations à moyen terme du plan stratégique IFREMER anticipent largement les mutations en cours ne niveau européen, ainsi que les efforts faits par les cinq régions du programme MARITTIMO pour intégrer informations et données scientifiques dans la zone transfrontalière de coopération et leur donner une meilleure visibilité. Néanmoins, les défis techniques sont encore nombreux à relever et exigeront une mutation lente des compétences avec toujours plus d'assistance « intelligente » de la part des machines.

Pour le court terme, il est encore difficile d'anticiper ce que pourront être les engins utilisables pour la surveillance environnementale à l'horizon 2030. Concernant l'environnement profond des réponses sont déjà données avec la diffusion des AUV profonds à long rayon d'action et les systèmes hybrides de type HROV embarquables sur des navires plus légers. Pour l'environnement littoral et côtier il faut espérer le développement d'engins moins coûteux et plus autonomes permettant d'assister l'opérateur dans ses tâches les plus contraignantes: prélèvements semi-automatisés, mesure à plus haute fréquence, réutilisation à distance de la donnée en temps-réel, utilisation de plate-formes formes mobiles de plus en plus flexibles etc. Ces nouveaux outils nécessiteront également une nouvelle organisation du travail permettant d'optimiser leur mise en œuvre et leur suivi technique.



Travail réalisé dans le cadre du projet SICOMARPLUS,  
financé par le Programme de coopération  
Italie-France Maritime 2014-2020



# **Annexes**

**A - Bibliographie**

**B – Quelques liens internet**

## A – Bibliographie

I. Amouroux I., 2019, Plan POLMAR terre – Annexe 2 « que faire en cas de pollution chimique accidentelle ? », 13/02/2019, ARCHIMER

Rivollet B., Serre C.E. 2014, « Les drones pour la surveillance environnementale », Note de veille technologique, CAPTIVEN.fr

Isaak T., 2015, « SMILE, la bouée qui veille sur l'environnement en Baie de Seine », Communiqué de presse IFREMER, 17/11/2015.

Isaak T., 2015, «SPEEDO, le drone marin à l'assaut des vagues », Communiqué de presse IFREMER, 04/11/2015.

Bayat et al., 2017, « Environmental Monitoring using Autonomous Vehicles: a survey of recent searching techniques », Current Opinion in Biotechnology, Volume 45, June 2017, Pages 76-84, ISSN 0958-1669. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.009>.

Pooja et al., 2020, « Sensors in Water pollutants Monitoring: Role of materials », 319p., Springer Singapore, ISSN 2662-558X, <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0>.

Dunbabin, Matthew & Marques, Lino., 2012, « Robots for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications », IEEE Robotics & Automation Magazine - IEEE ROBOT AUTOMAT. 19. 24-39. 10.1109/MRA.2011.2181683.

Daniel O.B. Jones et al., 2019, « Autonomous marine environmental monitoring: Application in decommissioned oil fields », Science of The Total Environment, Volume 668, ,Pages 835-853,ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.310>.

Duarte M. et al., 2016, « Application of swarm robotics systems to marine environmental monitoring ». In OCEANS 2016 - Shanghai <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485429>

Duarte M et al., 2016, « Evolution of Collective Behaviors for a Real Swarm of Aquatic Surface Robots », Plos One, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151834>.

Sung Y., Dixit D., Toketar P., 2019, « Environmental Hotspot Identification in Limited Time with a UAV Equipped with a Downward-Facing Camera », 7 p., submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, [arXiv:1909.08483](https://arxiv.org/abs/1909.08483)

Li Teng et al., 2019 « Coverage Sampling Planner for UAV-enabled Environmental Exploration and Field Mapping », submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, [arXiv:1907.05910](https://arxiv.org/abs/1907.05910)

Fraga J. et al., 2014, « Squirtle: An ASV for Inland Water Environmental Monitoring. », In: Armada M., Sanfeliu A., Ferre M. (eds) ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 252. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03413-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03413-3_3)

Daniel Anne et al., « Développement d'un drone nautique pour le prélèvement d'échantillons d'eau en milieu côtier et estuarien (SPEEdoo) », La Houille Blanche, n° 3, 2016, p. 39-41, <https://doi.org/10.1051/lhb/2016029>

Frédéric Cyr, Marc Tedetti, Florent Besson, Nagib Bhairy, Madeleine Goutx, 2019 « A Glider-Compatible Optical Sensor for the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Marine Environment », Frontiers in Marine Sciences, 6:110, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00110>

## **B – Quelques liens internet**

### *Services de données français et européens*

<https://www.seadatanet.org/Metadata>

<https://www.odatis-ocean.fr/qui-sommes-nous>

<https://www.ir-ilico.fr/L-infrastructure-de-recherche>

<http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/ARGO>

<http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/GLIDERS/EGO-gliders>

<https://www.ego-network.org/dokuwiki/doku.php?id=public:whatisego>

### *HROV*

<https://wwz.ifremer.fr/Actualites-et-Agenda/Toutes-les-actualites/Archives/2015/HROV-Ariane-le-dernier-ne-des-engins-sous-marin-de-l-Ifremer>

<https://www.entreprises-occitanie.com/portraits/aurelien-majorel-nous-demarrons-la-commercialisation-de-notre-robot-sous-marin-innovant>

<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/robotique-robot-sous-marin-completement-autonome-56440/> (Japan ROV)

### *AUV*

<https://www.enviro2b.com/2018/11/12/le-drone-sous-marin-larvalbot-a-la-rescousse-des-recifs-coralliens-endommages-par-le-changement-climatique/>

<https://www.ecagroup.com/en/business/futura-sciencescom-auv-a6k-new-explorer-deep-sea>

<https://phys.org/news/2019-03-robots-revolutionise-marine-environmental.html>

<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/robotique-aquanaut-sous-marin-transforme-robot-humanoide-77015/>

### *ASV*

<http://projects.noc.ac.uk/massmo/meet-thomas-marine-robot>

<http://www.seaproven.com/nos-realizations/sphyrna/>

<https://wwz.ifremer.fr/webtv/Thema/Circulation-oceanique/VAIMOS>

## ***Gliders / Waveglider***

<http://www.lamma.rete.toscana.it/news/arriva-il-waveglider-piattaforma-oceanografica-avanzata>

[http://www.ismar.cnr.it/infrastructures/instrumentation-and-equipments/Slocum-Glider-Teresa/index\\_html?set\\_language=en&cl=en](http://www.ismar.cnr.it/infrastructures/instrumentation-and-equipments/Slocum-Glider-Teresa/index_html?set_language=en&cl=en)

<http://www.dt.insu.cnrs.fr/spip.php?article8> (Parc national français de gliders)

## ***Bouées automatisées***

<http://www.captiven.fr/sites/default/files/Fiche%20information%20MAREL.pdf>

## ***Flottes d'engins***

<https://navaltoday.com/2018/08/01/us-navy-working-on-breaking-ocean-glider-swarm-record/>  
<https://www.naval-group.com/fr/news/dcms-reussit-une-premiere-europeenne-le-deploiement-coordonne-de-trois-types-de-drones/>

## ***Lutte contre la pollution***

<http://wwz.cedre.fr/>

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/dispositif-polmarterre>

<http://polmar.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/polmar/index.php?page=references-centre-de-marseille>

[http://www.haute-corse.gouv.fr/IMG/pdf/Disposition\\_specifique\\_POLMAR-terre.pdf](http://www.haute-corse.gouv.fr/IMG/pdf/Disposition_specifique_POLMAR-terre.pdf)

<http://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/3757/21946/file/O>

<http://www.dcsmm-d4.fr/la-directive-cadre-strategie-pour-le-milieu-marin-dcsmm>

## ***Capteurs/actionneurs***

<https://www.carnot-mines.eu/fr/avec-sa-technologie-du-%C2%AB-sens-%C3%A9lectrique-%C2%BB-elwave-%C3%A9quipe-les-robots-d%E2%80%99un-6e-sens>

<https://sciencepost.fr/ce-robot-sinspire-des-crevettes-pour-percer-la-roche/>

<https://www.mbari.org/lrauv-and-esp/> (US AUV automatic laboratory)

## ***Supervision intelligente***

[https://unige.it/ricerca/prog\\_euint/vetrina14-20\\_Marittimo](https://unige.it/ricerca/prog_euint/vetrina14-20_Marittimo)  
<https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/projects/hrov-arch.html>