

Session 1 : Off-shore - Inspection - Maintenance - Réparation

SAGA, PREMIER SOUS-MARIN INDUSTRIEL AUTONOME

J. Mollard, D. Sauzade

GIE SAGA
149 Plage de l'Estaque
13016 Marseille

SAGA, développé en France par l'IFREMER et la COMEX, est le premier prototype d'une nouvelle génération de sous-marins industriels capables d'intervenir avec plongeurs ou robots à proximité immédiate du chantier et de façon totalement indépendante de la surface.

SAGA (28 mètres de long, 550 tonnes de déplacement en plongée, six hommes d'équipage) est équipé d'un compartiment hyperbare pour 4 à 6 scaphandriers. Plusieurs innovations importantes, notamment en matière énergétique, concourent à donner au SAGA une autonomie en plongée indispensable pour l'exécution des travaux sous-marins profonds.

Le sous-marin SAGA a été lancé en Octobre 1987. Il vient d'accomplir un programme de mise au point et de qualification de trois ans. Il détient, depuis mai 1990, le record de profondeur (-317m) d'intervention par plongeur depuis un sous-marin.

Ce papier présente les technologies nouvelles utilisées pour la réalisation du SAGA et dresse un premier bilan de ce projet ambitieux.

Session 1 : Off-shore - Inspection - Maintenance - Repair

SAGA, FIRST INDUSTRIAL AUTONOMOUS SUBMARINE

J. Mollard, D. Sauzade

GIE SAGA
149 Plage de l'Estaque
13016 Marseille

Developed in France by IFREMER and COMEX, SAGA is the first prototype of a new generation of industrial submarines capable of carrying out underwater operations using divers or robots at close proximity to the work site without surface assistance.

SAGA (28 meters long, 550 tons submerged displacement, 6 crew members) has a hyperbaric compartment for 4 to 6 divers. Several important innovations, in particular with regards to energy, give SAGA an exceptional autonomy, essential for performing deep underwater operations.

The submarine was launched in October 1987 and has just completed a three-year qualification programme. Since May 1990 SAGA holds the world record of the deepest (-317m) diver lock-out operation from a submarine.

This paper presents the new technologies used for the construction of SAGA and draws up a first appraisal of this ambitious project.

PROJET SAGA

TECHNOLOGIES, BILAN DES ESSAIS ET PERSPECTIVES

Jean MOLLARD (*) et Didier SAUZADE (**)

(*) COMEX, Chef de Projet SAGA; (**) IFREMER, Directeur Exécutif du GIE SAGA

RESUME

SAGA, sous-marin à grande autonomie lancé en 1987 par COMEX et IFREMER, est le premier prototype d'une nouvelle génération de sous-marins industriels, capables de réaliser des opérations avec plongeurs ou ROVs à proximité immédiate du site de travail, sans aucune assistance en surface. Ce sous-marin de 28 mètres, avec un déplacement en plongée de 550 tonnes a un équipage de 6 personnes et peut intervenir jusqu'à 600 mètres. SAGA comprend un compartiment hyperbare pour 6 plongeurs en saturation.

Plusieurs technologies avancées, notamment en ce qui concerne la source d'énergie et le stockage des gaz, donnent au SAGA une autonomie opérationnelle d'environ deux semaines, sans faire surface. SAGA vient d'achever un programme de mise au point et de qualification en mer de trois ans. Cette communication passe en revue les technologies utilisées et présente un premier bilan des essais ainsi que les perspectives d'utilisation du sous-marin.

INTRODUCTION

Les travaux sous-marins, par plongeurs ou ROVs, nécessitent actuellement la mise en oeuvre de navires spécialisés, ce qui contraint à des transferts fond-surface improductifs et expose d'exécution de ces travaux aux aléas météorologiques.

L'utilisation de sous-marins permet de s'affranchir des difficultés liées à la surface. Cependant, leur réalisation posait des problèmes technologiques non résolus jusqu'à présent.

SAGA est le premier prototype d'une nouvelle génération de sous-marins industriels capables d'intervenir avec plongeurs ou robots à proximité immédiate du chantier et de façon totalement indépendante de la surface.

SAGA (28 mètres de long, 550 tonnes de déplacement en plongée) six hommes d'équipage) est équipé d'un compartiment hyperbare pour 4 à 6 scaphandriers. Plusieurs innovations importantes, notamment en matière énergétique, concourent à donner au SAGA une autonomie en plongée indispensable pour l'exécution de travaux sous-marins profonds. Il peut ainsi parcourir en plongée 150 milles nautiques, se poser sur le fond à proximité du chantier, faire intervenir ses scaphandriers et leurs outils et revenir à sa base sans avoir fait surface. L'autonomie en plongée peut atteindre dans certaines conditions trois semaines (voir caractéristiques en Table 1 et schéma en Fig. 1).

TABLE 1 :

<i>PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU SAGA</i>	
<i>Principaux paramètres :</i>	
Longueur hors tout	28,06 m
Largeur hors tout	7,40 m
Hauteur hors antennes	8,50 m
Déplacement en surface	303 T
Tirant d'eau en surface	3,65 m
Déplacement en plongée	545 T
Immersion maximale	600 m
Immersion pour la plongée humaine	450 m
<i>Générateurs de puissance :</i>	
En surface : 1 moteur Diesel HISPANO-SUIZA ...	175 kW
En immersion : 2 moteurs STIRLING 2 x 75 kW
<i>Stockage de gaz et d'énergie :</i>	
Combustible	6200 l
Stockage cryogénique de l'oxygène	6500 kg
Air, gaz de plongée et oxygène	5600 Nm ³
Batterie principale	700 kWh
Energie totale stockée à bord sous forme électrique et chimique	10500 kWh
<i>Certification :</i>	
Lloyd's Register of Shipping (classe 100 A1)	
Bureau Véritas (classe 1 3/3 - E)	
<i>Systèmes de navigation, moyens de communication :</i>	
Comparables à ceux d'un sous-marin militaire conventionnel.	
<i>Capacités chantier :</i>	
- Charge utile compensable : 3 tonnes dans l'eau.	
- Moyens d'observation : poste de pilote à vue à l'avant, plusieurs caméras avec éclairage.	
- Possibilité de mettre en oeuvre un ROV (robot).	
- Capacité d'embarquer en condition atmosphérique un ou plusieurs passagers.	

SAGA.

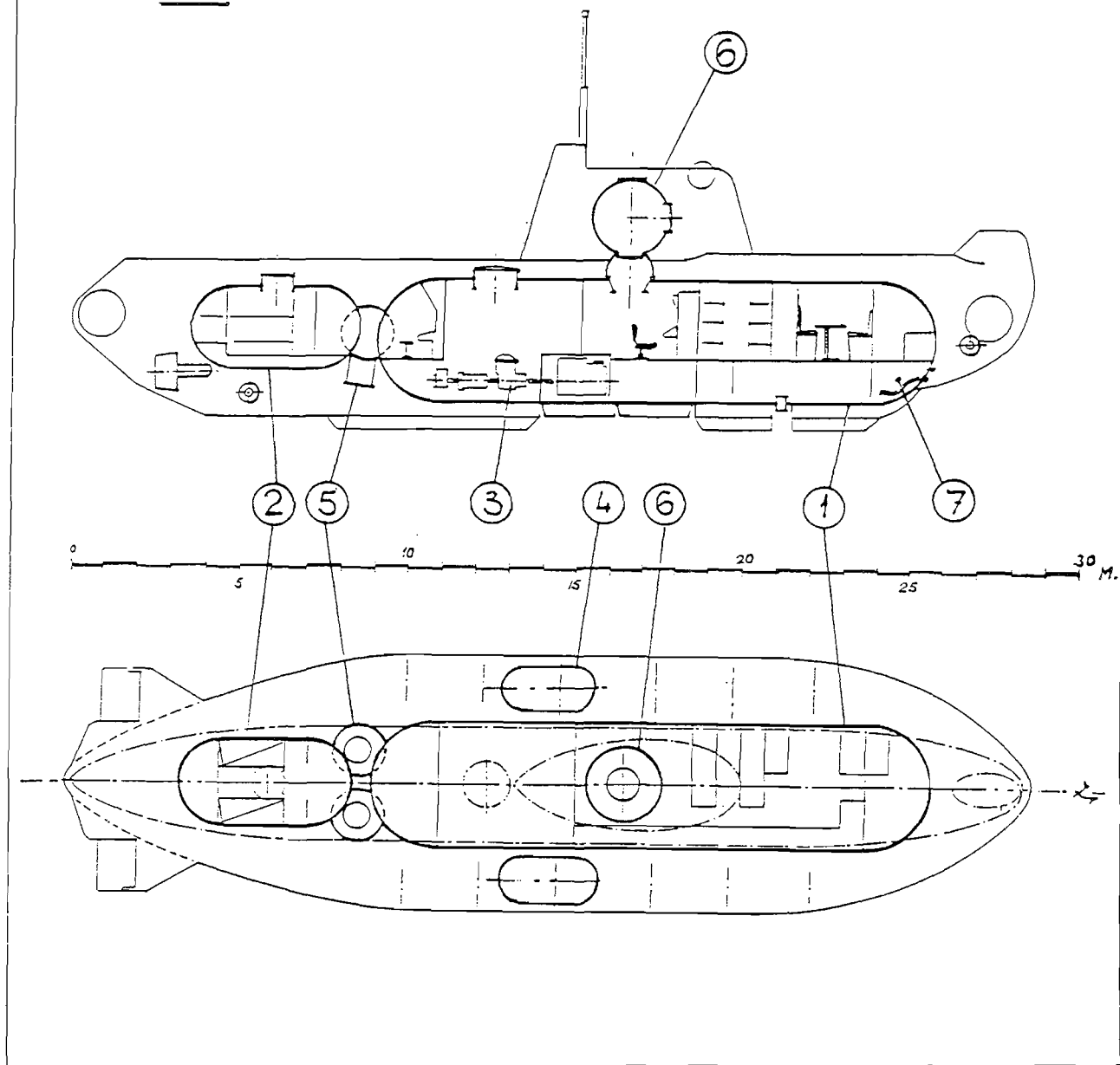


Fig. 1 : Le sous-marin SAGA. Ce sous-marin de 28 m de long, déplaçant 545 tonnes en plongée, est opéré par un équipage de 6 personnes dans le compartiment atmosphérique (1). Il comporte à l'arrière un compartiment hyperbare (2) pouvant accueillir jusqu'à 6 plongeurs en saturation. Grâce à ses moteurs Stirling (3), les stockages cryogéniques de l'oxygène (4) et les réservoirs de gaz haute pression, le sous-marin peut parcourir en plongée une distance de 150 milles, se positionner sur le fond à proximité du site de travail, faire intervenir les plongeurs par les sas (5) et/ou un robot opéré à partir de la sphère (6) située dans le kiosque, embarquer ou débarquer du matériel et observer directement le site de travail à travers les hublots de la sphère et du poste de pilotage à vue (7). Le chantier terminé, le sous-marin peut retourner à sa base en plongée, sans avoir eu besoin de faire surface pendant une durée totale de deux semaines.

SAGA a été développé par l'IFREMER et COMEX associés dans un Groupement d'intérêt économique (GIE SAGA).

L'IFREMER est l'établissement public français chargé de recherche et de développement technologique pour l'exploitation des ressources de la mer.

La COMEX, société multinationale française, est leader mondial dans le domaine des travaux offshore, de la technologie sous-marine et de la plongée.

Le budget de réalisation du projet SAGA est de 180 millions de francs environ financés par l'IFREMER, COMEX et d'autres partenaires.

SAGA a notamment bénéficié de l'aide du Fonds de Soutien aux Hydrocarbures (Ministère français de l'Industrie) et de celle de la CEE (DG XVII) pour certains composants.

LES TECHNOLOGIES DU SAGA

La construction de SAGA a débuté en 1985 à Marseille, en reprenant quelques éléments dont la coque de l'ARGYRONETE, projet du Commandant Cousteau arrêté en 1972.

Sa réalisation fait appel à des technologies avancées notamment dans le domaine énergétique. SAGA est ainsi le premier sous-marin au monde, avec le sous-marin NAKEN de la Marine Royale suédoise, à être équipé de moteurs thermiques anaérobies de type Stirling, alimentés en oxygène stocké sous forme liquide. D'autres innovations importantes concernent l'automatisation du pilotage, les scaphandres à faible consommation énergétique et de gaz, l'utilisation de matériaux composites, notamment pour la réalisation de stockage de gaz haute pression.

Moteurs Stirling anaérobies

SAGA est équipé de deux moteurs Stirling qui fournissent en plongée la puissance nécessaire à la propulsion et à l'alimentation électrique. Ils produisent également la chaleur utilisée pour le chauffage du compartiment hyperbare ainsi que la protection contre le froid des plongeurs pendant leurs sorties en scaphandre.

Imaginé dès 1816 par le pasteur écossais Stirling, le développement, l'industrialisation et la commercialisation du moteur Stirling pour la propulsion marine, ont été entrepris depuis les années 1970 en Suède par la société United Stirling maintenant intégrée au chantier naval Kockums à Malmö.

C'est un moteur à pistons entraînant un arbre et dont le gaz de travail opère en circuit fermé. La source chaude est constituée par une chambre de combustion externe aux cylindres et la source froide par une circulation d'eau.

Un rendement élevé et un niveau de bruit et de vibration faible, la possibilité d'évacuer directement les gaz de combustion sous pression et d'employer de l'oxygène pur, confèrent à ce type de moteur un intérêt

particulier pour son utilisation à bord de sous-marins dont l'autonomie peut ainsi être accrue.

Les deux moteurs Stirling du sous-marin SAGA ont une puissance de 75 kW. (caractéristiques en Table 2).

TABLE 2 :

<i>CARACTERISTIQUES DES MOTEURS STIRLING DU SOUS-MARIN SAGA</i>	
Gaz de travail	Hélium
Pression de combustion	22 bars
Vitesse	2400 tr/mn
Consommation de fuel	260 g/kWh
Consommation d'oxygène	980 g/kWh
Puissance maximale sur arbres	75 kWh
Chaleur récupérable sur les gaz de combustion	18 kW

Ils sont caractérisés par une chambre de combustion pressurisée à 22 bars, dans laquelle brûle de l'oxygène pur et un fuel à faible teneur en soufre. Le gaz de travail est l'hélium, l'hydrogène plus performant ayant été écarté pour des raisons de sécurité (caractéristiques en Table 2).

Les principaux problèmes de développement ont concerné :

- la tenue mécanique des matériaux soumis à de fortes variations de température.
- l'étanchéité sur des pièces en mouvement vis-à-vis de l'hélium à forte pression (130 bars).
- le contrôle des écoulements complexes des fluides à très haute température (de 200 à 2000°K) dans la chambre de combustion.
- la réalisation d'échangeurs (régénérateurs) à très grande surface d'échange et faible inertie thermique.

Un problème particulier - celui de l'échappement des gaz - a dû être résolu spécialement pour l'application SAGA. Les gaz brûlés, étant à une pression de 22 bars sont évacués directement pour des immersions inférieures à 200 mètres. Au-delà et jusqu'à l'immersion maximale du SAGA (600 mètres), il faut surcomprimer les gaz brûlés et les condensats, ce qui a nécessité la mise au point d'un surpresseur spécifique réalisé par le GIE SAGA.

Stockage cryogénique de l'oxygène

L'autonomie énergétique dépend des quantités de fuel et d'oxygène à bord. Le fuel est stocké dans des réservoirs non-résistants. Le stockage de l'oxygène est le facteur limitatif parce qu'il doit être stocké dans des réservoirs résistants et qu'il faut environ 4 fois plus d'oxygène que de fuel pour produire 1 kWh. L'oxygène peut être stocké soit sous forme gazeuse soit sous forme liquide. Un mètre cube de liquide correspond à 1,21 tonnes d'oxygène, soit environ deux fois plus qu'un mètre cube d'oxygène gazeux à 400 bars. De plus l'oxygène liquide est environ quatre fois moins cher que l'oxygène gazeux, tout en étant d'approvisionnement facile.

SAGA est équipé de deux réservoirs cryogéniques situés à l'extérieur de la coque résistante, donnant une capacité totale de 6,5 tonnes. L'oxygène gazeux et sa pressurisation sont obtenus par vaporisation dans des échangeurs chauffés par l'eau de mer ambiante.

Performance du module d'énergie

La densité gravimétrique du module d'énergie du sous-marin, comprenant le fuel, l'oxygène, les stockages et les deux moteurs Stirling, est environ de 0,25 kilowattheure électrique par kilogramme sans tenir compte de la chaleur récupérée pour les plongeurs. Cette performance est très supérieure à celles des sources électrochimique et comparable à celles des piles à combustible encore en développement.

Utilisation de matériaux composites

L'utilisation des matériaux composites à bord d'un sous-marin est particulièrement avantageuse en ce qui concerne le poids dans l'eau. Selon les applications, le poids dans l'eau par rapport à l'acier est 2 à 3 fois plus faible pour les réservoirs résistants et 4 à 5 fois plus faible pour les tôles. De plus, les matériaux composites sont insensibles à la corrosion marine.

Les réservoirs de gaz haute pression

L'objectif était de réaliser des réservoirs à haute pression (400 bar) en minimisant leur poids dans l'eau.

La solution a consisté à développer des réservoirs dont le corps cylindrique en acier est renforcé par un enroulement circonférentiel, réalisé sous tension, de bandes de fibres de Kevlar imprégnées de résine (frette). Par cette technique, la pression de service du liner en acier est doublée pour une augmentation de poids dans l'eau limitée à 15 %.

Ces réservoirs sont utilisés pour stocker l'air comprimé nécessaire au bord, les gaz pour la plongée humaine et éventuellement l'oxygène complémentaire pour les moteurs.

Caisses résistantes haute pression

Il s'agit des caisses de réglage du sous-marin qui permettent de compenser les variations de pesée du sous-marin en plongée, dues principalement aux consommations d'oxygène.

Ces caisses sont conçues pour pouvoir subir la pression maximale d'immersion en interne ou externe, l'autre face pouvant être à la pression atmosphérique.

Autres applications en matériaux composites

Elles ont concerné le carénage du sous-marin, réalisé en partie en matériaux sandwich, les tuyères de propulsion, les ballasts et l'isolation externe de l'habitat hyperbare.

Pilotage assisté par ordinateur

L'espace vital dans un sous-marin constitue un paramètre de dimensionnement critique. Il était donc important de limiter l'équipage et en conséquence d'automatiser autant que possible les fonctions de contrôle et de pilotage.

Le pilotage assisté par ordinateur du SAGA est assuré de deux ensembles distincts :

- Le Système de Supervision

Il s'agit d'un système d'aide à la décision réalisé autour d'un ensemble d'acquisition rapide de données et d'un ordinateur multitâches, multipostes, temps réel, qui gère environ 300 capteurs de natures diverses.

Le système de supervision, qui se présente à l'utilisateur sous forme de deux consoles vidéo, a différentes fonctions.

- . Présentation de l'état de marche des installations du bord sous forme de synoptiques (propulsion, stockage de gaz, ...).
- . Aide à la navigation en gérant les différents équipements du bord
- . Aide à la sécurité par la gestion des alarmes, le suivi des paramètres de fonctionnement et le dispositif "homme mort".

- Le Système de Régulation d'Energie

Il gère de façon active l'ensemble des installations du bord concernant l'énergie et la propulsion : moteur Diesel surface, moteurs STIRLING, génératrices électriques, moteurs de propulsion. Il se présente sous forme d'un pupitre de commande et est construit autour d'un automate à micro-processeur industriel. Doté d'actuateurs il dispose automatiquement les différents équipements gérés selon les ordres du Pilote.

Les essais ont montré que ces systèmes allègent considérablement la tâche de pilotage puisque le sous-marin peut être piloté en transit par une seule personne.

TABLE 3 :

DEROULEMENT DU PROGRAMME DE QUALIFICATION EN MER

	PHASE I Décembre 87 à Mai 88	PHASE II Février 89 à Août 89	PHASE III Février 90 à Mai 90
Plongée fictive (0 m)	48 h de confinement	48 h de confinement	12 h de confinement (vérification)
Essais de stabilité	- Plongée statique - Essais de stabilité	- Plongée statique	- Plongée pesée
Plongées de sécurité	- Plongée à 1,1 P Essais de la coque à 667 m	-	- Essais fonctionnels d'équipements à la profondeur maximale (600 m)
Navigation	- Première plongée en route libre - Essais en plongée	-	- Essais de navigation
Propulsion	- Poussée au point fixe - Essais en surface - Essais en plongée avec moteurs électriques	- Essai du système LOX - Essais en surface et en plongée des moteurs Stirling (180 m)	- Essais moteurs Stirling - Essais avec surpresseur d'échappement jusqu'à 600 m
Essais avec plongeurs	- Essais préliminaires avec plongeurs à 15 m	- Saturation à 30 m - Saturation à 100 m - Saturation à 180 m	- Saturation à 317 m

Scaphandre faible consommation

L'équipement individuel des plongeurs a été développé spécifiquement pour SAGA. Les développements ont porté sur l'appareil de respiration et sur l'habit chauffant du plongeur.

Réduire le plus possible la quantité de gaz nécessairement perdue par les appareils de respiration des plongeurs est un impératif dans le cas d'un système embarqué sur un sous-marin autonome. Les performances et la fiabilité des systèmes existants n'étant pas satisfaisantes au-delà de 200 mètres de profondeur d'eau, il a été développé un système original, de type semi-fermé, avec assistance respiratoire. Ces appareils ont donné satisfaction au cours des différents essais, y compris lors des essais HYDRA VI au Centre Hyperbare de COMEX à Marseille (- 520 mètres, avec des mélanges hélium/hydrogène) et au cours des essais à moyenne et grande profondeur du sous-marin.

Le chauffage des plongeurs en saturation et en intervention constitue une dépense énergétique très importante pour un sous-marin autonome. Les habits existants sont alimentés par un débit important d'eau de mer tiède, de l'ordre de 40 à 50 l/mn. L'habit développé est caractérisé par une protection thermique élevée, due à l'emploi de matériaux sandwich, et une répartition de l'eau de mer étudiée, qui permet de fonctionner avec un débit d'eau faible de l'ordre de 5 l/mn, tout en restant fonctionnel du point de vue de l'ergonomie.

Ces habits sont alimentés en eau de mer réchauffée par échange thermique avec les gaz de combustion du moteur Stirling en service.

BILAN DU PROGRAMME D'ESSAIS

Le programme de qualification a été conduit en trois phases (Table 3) séparées par des périodes de mise au point. Ce phasage a permis de limiter les conséquences du retard pris par le développement des moteurs Stirling par rapport à la réalisation du sous-marin.

Chaque phase a comporté des essais similaires (comme les essais de stabilité et les plongées fictives) et s'est achevée par une mission avec sortie de plongeurs.

En Phase I, le sous-marin était opéré en mode Diesel-électrique, ce qui limitait l'autonomie en plongée à quelques dizaines d'heures. Les plongeurs ont réalisé une sortie de courte durée à faible profondeur.

En Phase II, le sous-marin était équipé de moteurs Stirling provisoires, limités en puissance et en profondeur d'utilisation. Cependant, il a été possible de réaliser en août 1989 une opération sur un chantier réel au large de Monaco avec des plongeurs en saturation à 100 mètres, puis à 180 mètres pour essais.

La Phase III a été la phase de qualification finale, avec les moteurs Stirling définitifs équipés du surpresseur d'échappement qui a été testé jusqu'à la profondeur de 600 mètres.

Cette configuration a permis d'utiliser le sous-marin dans son domaine opérationnel complet. Il a ainsi été possible de réaliser une saturation complète à moins 300 mètres pour quatre plongeurs et de porter le record mondial d'intervention par plongeurs à partir d'un sous-marin à moins 317 mètres, le 6 mai 1990 au large du Cap Bénat (Var).

Au cours du programme de qualification, le sous-marin a réalisé 68 jours d'opération à la mer, comprenant 135 heures posé sur le fond et 28 heures extra-véhiculaire pour les plongeurs à des profondeurs allant jusqu'à 317 mètres. Les moteurs Stirling ont tourné 120 heures à la mer et à des profondeurs jusqu'à 600 mètres.

En conclusion, les principaux objectifs de ce programme ont été atteints :

- essayer en conditions réelles les technologies développées. Cette phase est essentielle lorsqu'il s'agit d'équipements destinés à un environnement difficile comme la mer et elle constitue une étape indispensable pour faire accepter par les milieux industriels de nouvelles technologies.
- prouver la faisabilité du concept de l'intervention à partir d'un sous-marin autonome et disposer d'éléments pour le futur de l'intervention sous-marine.
- disposer d'un engin ayant des capacités opérationnelles pour réaliser une grande variété de travaux sous-marins.

PERSPECTIVES

SAGA est à présent disponible pour réaliser une grande variété de travaux sous-marins jusqu'à des profondeurs de 600 mètres, de façon très concurrentielle par rapport aux moyens conventionnels.

Dans le domaine de l'offshore pétrolier SAGA intervient par plongeurs ou par robot ROV pour des missions telles que l'inspection de pipelines, la maintenance d'infrastructures sous-marines, l'assistance aux chantiers de construction et de réparation. Sa capacité d'opérer quelles que soient les conditions météorologiques en surface lui confère un intérêt supplémentaire pour les interventions urgentes.

Pour la recherche scientifique, l'autonomie de SAGA en fait un outil bien adapté aux missions d'études de l'environnement marin par observation directe et échantillonnage ainsi que pour les recherches archéologiques.

SAGA peut également être utilisé pour des missions d'intérêt général telles que l'intervention sur épave et la prévention de la pollution marine.

Enfin, SAGA constitue une plateforme expérimentale pour la recherche technologique, permettant par exemple de préparer l'exploitation en sécurité des ressources offshore situées sous les glaces.