



## SPECIFICATION D'ENSEMBLE

- Coque résistante
- Coque Extérieure et charpente
- Installations de propulsion
- Installations relatives à la pesée
- Installations électriques
- Aménagements intérieurs - Habitabilité
- Installations relatives aux fluides
- Équipements de navigation et de contrôle
- Installations relatives à la plongée

**-Calculs – Maquettes – Essais**



11. - CALCULS - MAQUETTES - ESSAIS

11.01 CALCULS GENERAUX

11.02 BILAN ENERGIE

## S O M M A I R E

	<u>Page</u>
<b>11.01    CALCULS GENERAUX</b>	
1.    INTRODUCTION.....	1
2.    SITUATIONS DE REFERENCE.....	1
3.    ETUDE DE LA PESEE DU SOUS-MARIN.....	1
4.    DEPLACEMENTS ET FLOTTABILITE.....	2
5.    STABILITE EN PLONGEE .....	5
6.    STABILITE INITIALE EN SURFACE .....	5
<b>11.02    BILAN ENERGIE</b>	
1.    GENERALITES .....	7
2.    BILAN ENERGIE MISSION N° 1 .....	8
2.1    Définition opérationnelle de la mission .....	8
2.2    Besoins énergétiques .....	8
2.3    Fourniture d'énergie, oxygène moteur .....	10
2.4    Répartition des stockages de gaz respiratoires .....	11
2.5    Conclusions du bilan énergie de la mission n° 1 .....	12
3.    BILAN ENERGIE MISSION N° 2 .....	13
3.1    Définition opérationnelle de la mission .....	13
3.2    Besoins énergétiques .....	13
3.3    Fourniture d'énergie, oxygène moteur .....	15
3.4    Répartition des stockages de gaz respirables .....	16
3.5    Conclusions du bilan énergie de la mission n° 2 .....	16



11.01 CALCULS GENERAUX

1. DENSITE DE L'EAU DE MER

La densité de référence est de 1,025.

Le programme de densité couvre les valeurs de 1,020 à 1,030.

2. SITUATIONS DE REFERENCE

Pour tous les problèmes où intervient la gravité, il est défini une situation de référence du sous-marin, qui est celle du véhicule en plongée, parfaitement pesé, en flottabilité et en assiette nulle, à vitesse nulle.

La flexibilité qui caractérise le stockage des gaz dans le sous-marin a conduit à définir deux situations de référence correspondant aux deux missions types.

La situation de référence 1 correspond à la mission type 1 définie dans les spécifications opérationnelles et prend en compte un chargement mixte de capacités de stockage HP : hélium/héliox pour la plongée, oxygène pour la respiration et l'énergie.

La situation de référence 2 correspond à la mission type 2 (sans plongée humaine) et prévoit une affectation de l'ensemble des capacités de stockage HP à l'oxygène pour l'énergie et la respiration.

3. ETUDE DE LA PESEE DU SOUS-MARIN

Cette étude a été réalisée en utilisant la méthode des graphiques de GIROUSSE qui permet :

- de vérifier l'aptitude des caisses de réglage à compenser en moment et en poids, les consommations du sous-marin en cours de mission pour l'ensemble des densités du programme.
- de déterminer les tests liquides en situation de référence.



La détermination des lests liquides permet de calculer les lests fixes de quille et intérieurs puis de les régler à l'issue de l'expérience de plongée statique.

Les résultats de cette étude permettent de conclure

- à un dimensionnement correct des caisses de réglage
- au fait qu'il sera possible de faire face aux divers programmes de chargement sans changer le lest de quille et en jouant, pour de faibles quantités (quelques centaines de kilos), sur les lests intérieurs.

Ces résultats devront être confirmés après établissement du devis de masse final, et exploitation des résultats de l'expérience de plongée statique.

#### 4. DEPLACEMENTS ET FLOTTABILITE

Le devis de masse provisoire, ainsi que les calculs de volumes permettent de se faire une idée des diverses grandeurs caractéristiques du sous-marin à la densité de référence (1,025). (Voir tableaux I et II pages suivantes).

- Déplacement en surface  $P_S$  : environ 292 tonnes
- Volume utile des ballasts : environ  $50 \text{ m}^3$
- Déplacement en plongée  $P_P$  : environ 343 tonnes

On en déduit :

- la flottabilité : 51 tonnes
- le coefficient de flottabilité :  $0,15 \frac{(P_P - P_S)}{P_P}$

**RECAPITULATIF DES DEVIS DE MASSES ET DE POUSSEE**
**TABLEAU I - SOUS-MARIN HORS APPROVISIONNEMENT**
**Convention :**

- Sous-marin en configuration hors approvisionnements, lest fixes et eau des ballasts ; lest largable inclu.
- Les distances horizontales sont mesurées depuis la PPAR.
- Les distances verticales sont mesurées depuis la OH.

DESIGNATION	M.kg	x <sub>m</sub>	z <sub>m</sub>	V <sub>dm</sub> <sup>3</sup>	x <sub>m</sub>	z <sub>m</sub>
Coque résistante						
- Habitat hyperbare	9063	5,917	2,865	20779	5,956	2,722
- Sas de liaison	5217	8,595	2,213	3779	8,588	2,295
- Coque atmosphérique	62711	16,828	2,325	164162	17,010	2,260
- Sphère largable	3992	16,257	5,725	7089	16,216	5,758
Sous-total coque résistante	80913	15,048	2,543	195809	15,646	2,436
Charpente extérieure et coque mince	31999	14,318	2,679	8523	13,934	2,790
Equipements extérieurs	99492	15,626	2,685	79650	14,484	2,713
Equipements intérieurs	34119	16,055	1,746	0	0	0
Lest largable	10000	20,274	0,250	880	20,274	0,250
Lest intérieur	2000	17,850	0,700	0	0	0
<b>TOTAL SOUS-MARIN HORS APPROVISIONNEMENTS</b>	<b>258523</b>	<b>15,537</b>	<b>2,410</b>	<b>284862</b>	<b>15,283</b>	<b>2,518</b>

**TABLEAU II - SOUS-MARIN EN SITUATION DE REFERENCE**

Convention :

- Les distances horizontales sont mesurées depuis la PPAR
- Les distances verticales sont mesurées depuis la OH

DESIGNATION	M.kg	x <sub>m</sub>	z <sub>m</sub>	V <sub>dm</sub> <sup>3</sup>	x <sub>m</sub>	z <sub>m</sub>
<b>1. CONFIGURATION MISSION PLONGEE</b>						
- Sous-marin hors approvisionnements. Lests fixes et eau des ballasts y compris lest largable.	258523	15,537	2,410	284862	15,283	2,518
- Approvisionnements et personnels.	16819	15,021	2,847			
- Lests liquides (régleurs, caisses d'assiette).	2614	14,592	2,123			
- Eau caisses de compensation.	3206	6,970	2,768			
- Lest de quille (hors lest largable).	5500	10,000	0,250			
- Lest intérieur et marge devis masse	5322	14,572	0,876			
Déplacement surface	291984	15,283	2,368	284862	15,283	2,518
<b>2. CONFIGURATION MISSION SANS PLONGEUR</b>						
- Sous-marin hors approvisionnements. Lests fixes et eau des ballasts y compris lest largable.	258523	15,537	2,410	284862	15,283	2,518
- Approvisionnements et personnels.	19091	14,662	2,859			
- Lests liquides (régleurs, caisses d'assiette).	2614	10,267	2,171			
- Eau caisses de compensation.	1206	6,970	2,217			
- Lest de quille (hors lest largable).	5500	10,000	0,250			
- Lest intérieur et marge devis masse	5050	14,953	0,845			
Déplacement surface	291984	15,283	2,368	284862	15,283	2,518

5. STABILITE EN PLONGEE

Le module de stabilité en plongée, " $a_p$ ", est la distance verticale du centre de gravité au centre de carène en plongée, ballasts pleins, pour un état de référence donné.

Une première approximation pour les deux états de référence donne

$$a_p = 0,125 \text{ m}$$

On en déduit le facteur de stabilité qui est égal à

$$P_p \times a_p = 43 \text{ t/m}$$

6. STABILITE INITIALE EN SURFACE

La stabilité du sous-marin en surface s'étudie en transversal et en longitudinal.

Il n'y a pratiquement pas de variations entre les deux états de référence.

Le module de stabilité initiale transversale est égal à :

$$P_S = (r_s - a_s)$$

où  $r_s$  est le rayon métracentrique transversal et  $a_s$  la distance X verticale du centre de gravité au centre de carène en surface, ballasts vides.

Ces valeurs sont évaluées à :

$$a_s = 0$$

$$r_s = 1,38 \text{ m}$$

$$\text{soit } r_s - a_s = 1,38 \text{ m}$$

$$\text{et } P_s (r_s - a_s) = 403 \text{ t/m}$$

Le module de stabilité initiale longitudinale est égal à :

$$P_s (R - a_s)$$

où  $R$  est le rayon métracentrique longitudinal dont la valeur a été évaluée à 13,5 m.

Soit  $R - a_s = 13,5$  m

et  $P_s (R - a_s) = 3\ 940$  t/m

11.02 BILAN ENERGIE1. GENERALITES

Pour le sous-marin SAGA, le problème du bilan énergie se pose de façon relativement complexe dans la mesure où la quantité d'énergie disponible dépend de celle de l'oxygène stocké. Le stockage de l'oxygène énergie sous forme gazeuse se fait au détriment de celui des gaz utilisés pour les interventions de plongeurs.

L'objet de ce chapitre est donc de vérifier que les équipements prévus permettent de réaliser les missions type retenues du point de vue de l'autonomie sous toutes ses formes (distance parcourue, intervention plongeur, viabilité).

Les missions type, au nombre de 2, sont décrites dans le document ART.DP 12.04.102 du 15 Novembre 1983.

La mission n° 1 correspond à une intervention par plongeurs de 150 MN d'une base à terre à une profondeur de 150 m.

La mission n° 2 correspond à une mission d'observation à faible vitesse, sans intervention plongeurs, sur une zone, représentant un parcours de 190 MN, située à 100 MN d'une base à terre.



## 2. BILAN ENERGIE MISSION N° 1

### 2.1. Définition opérationnelle de la mission

- Transit aller en plongée : 150 MN à 4 noeuds soit 37,5 h profondeur moyenne 100 m
- Opération par une équipe de 6 plongeurs en saturation avec 2 plongeurs en intervention 12 h par jour pendant 7 jours.
- Transit retour dans les mêmes conditions que le transit aller.

### 2.2. Besoins énergétiques

#### 2.2.1 Energie nécessaire à la propulsion

- Puissance à fournir à chaque propulseur :  
15,0 kW pour une vitesse de 4 noeuds.

Estimée à partir des résultats d'essais conduits au Bassin des Carènes de Paris sur les formes du sous-marin ARGYRONETE.

- Rendement transmission hydrostatique : 75 %
- Puissance totale nécessaire :  
$$2 \times 15,0 \text{ kW} / 0,75 = 40,0 \text{ kW}$$
- Energie nécessaire à la propulsion :  
$$40,0 \text{ kW} \times 2 \times 37,5 \text{ h} = 3000 \text{ kWh}$$

#### 2.2.2 Energie consommée dans les réseaux électriques

L'énergie consommée dans chaque réseau a été estimée, généralement, en pondérant la puissance maximale de chaque récepteur par un coefficient d'utilisation.



Ceux-ci ont été évalués pour quatre situations différentes du sous-marin : transit en surface, transit en plongée, sous-marin posé au fond, sous-marin posé au fond avec plongeurs en intervention. Il a été tenu compte du rendement des convertisseurs.

Le détail de ces consommations fait l'objet d'une note technique.

Pour la mission type 1, pour chaque situation du sous-marin :

	Transit surface	Transit plongée	S/M au fond	Sous-marin avec intervention plongeurs
Nombre d'heures	h	0	75	84
Energie consommée	kWh	0	1535	1919

TOTAL RESEAUX : 4915 kWh

### 2.2.3 Bilan énergétique

- Opération au fond :	
. Intervention plongeurs	
Réseaux électriques hors outillages	1919
Outillage (estimation) 10 KW la moitié du	
temps d'intervention plongeurs	420
	_____

• Repos fond :	
Réseaux électriques	1461 kWh
	<hr/>
TOTAL	3000 kWh

Besoin total d'énergie pour la mission n° 1 : 8335 kWh.

## 2.3 Fourniture d'énergie, oxygène moteur

### 2.3.1 Besoins en oxygène moteur

En plongée, l'énergie est fournie par les moteurs Stirling. On vérifie que dans toutes les configurations il est suffisant d'avoir un seul moteur en marche, les pointes de consommation étant absorbées par la batterie principale.

La consommation nominale d'un moteur Stirling est de :

0,980 kg d'oxygène par kWh fourni.

La demande totale d'énergie correspond à :

8335 kWh x 0,980 kg = 8168 kg d' $O_2$

### 2.3.2 Stockage de l'oxygène moteur

Cette quantité est stockée :

- dans le système cryogénique qui peut débiter 2950 kg par réservoir soit : 5900 kg.
- pour le restant, soit 2268 kg, dans les stockages haute pression.

Cette dernière quantité représente un stockage initial de  $1790 \text{ Nm}^3$ , compte-tenu d'une température moyenne de chargement de  $10^\circ \text{C}$  et d'une pression minimale d'admission de 27 bars absolus. ( $\text{mv} = 1,36 \text{ kg/m}^3$ ).

Cette quantité peut se stocker de la façon suivante :

- Groupe des lots E<sub>2</sub> et G, capacité :  $728 \text{ Nm}^3$
- Groupe des lots I, J et H, capacité :  $1088 \text{ Nm}^3$

Soit au total

$1816 \text{ Nm}^3$

(Cf. tableau "Affectation des stockage des gaz" en spécification 07.00, généralités sur le stockage des gaz).

## 2.4 Répartition des stockages de gaz respiratoires

### 2.4.1 Stockage de l'oxygène respiratoire

Les besoins en oxygène respiratoire sont couverts, pour des interventions à 150 m par les fonds de bouteilles O<sub>2</sub> moteur, seuls sont donc à considérer le stock secours obligatoire et le stock de départ.

Affectation : Lots K et L, capacité totale : 256 Nm<sup>3</sup>.

### 2.4.2 Stockage des gaz de plongée

#### 2.4.2.1 Stock de sécurité d'hélium

Il doit être égal à une fois le volume pressurisé à la pression de l'immersion d'intervention, soit :

$$18,5 \text{ m}^3 \times 16,4 \text{ b} (1 + 16,4 / 400 \text{ b}) = 316 \text{ Nm}^3$$

en tenant compte de la pression résiduelle.

Affectation : Lot A , capacité totale : 320 Nm<sup>3</sup>

#### 2.4.2.2 Stock de sécurité d'héliox

Il doit permettre une heure de respiration au masque du personnel en saturation.

Pour une consommation minimale de 20 Nl/min, cela représente 123 Nm<sup>3</sup> en tenant compte de la pression résiduelle.

Affectation : Lot C , capacité totale : 128 Nm<sup>3</sup>.

#### 2.4.2.3 Stock d'hélium

Les opérations de compression et de décompression se font au port.

Le stock d'hélium doit compenser :

- les pertes pendant des opérations de plongée (15 % du volume inspiré).
- Les pertes lors des opérations de sassage (5 % du volume pressurisé).

**Pertes pendant les opérations de plongée :**

- La consommation nominale par plongeurs en saturation est évaluée à 40 Nl/min, soit un volume de perte horaire à 150 m de profondeur :

$$40 \text{ l/min} \times 60 \text{ min} \times (1 - 0,85) \times 16,4 \text{ b soit } 5,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Selon le régime d'intervention prévu cela représente :

$$12 \text{ h/j} \times 2 \times 5,9 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 7 \text{ j} = 991,2 \text{ Nm}^3$$

**Compensation des fuites :**

$$0,05 \times 20 \text{ m}^3 \times 16,4 \text{ b} \times 10,5 \text{ j} = 172,2 \text{ Nm}^3$$

Les besoins nets d'hélium s'élèvent au total à 1.165 Nm<sup>3</sup>.

Cette quantité est disponible dans les groupes constitués des lots B, D, E<sub>1</sub>, F représentant 1.232 Nm<sup>3</sup>.

2.5

#### CONCLUSIONS DU BILAN ENERGIE DE LA MISSION N° 1

Les performances attendues des équipements prévus permettent de réaliser la mission n° 1, du point de vue de l'énergie et de l'autonomie d'intervention par plongeurs, ces derniers utilisant un outillage relativement peu consommateur d'énergie.

### 3. BILAN ENERGIE MISSION N° 2

#### 3.1 DEFINITION OPERATIONNELLE DE LA MISSION

- Transit aller : 100 MN à 4 noeuds soit 25 h  
Profondeur moyenne 100 m
- Mission d'observation sur une distance de 190 MN à la vitesse de 1 noeud. Profondeur variant entre 300 et 600 m, profondeur moyenne : 450 m.
- Transit retour dans les mêmes conditions que le transit aller.

#### 3.2 BESOINS ENERGETIQUES

##### 3.2.1 Energie nécessaire à la propulsion

Parcours à 4 noeuds :

- Puissance à fournir à chaque propulseur : 15,0 kW
- Rendement global de la transmission hydrostatique : 75 %
- Puissance totale nécessaire :  
$$2 \times 15,0 \text{ kW} / 0,75 = 40 \text{ kW}$$
- Energie consommée :  $40 \text{ kW} \times 50 \text{ h} = 2000 \text{ kWh}$

Parcours à 1 noeud :

- Puissance à fournir à chaque propulseur : 1,5 kW
- Rendement global de la transmission hydrostatique : 50 %
- Puissance totale nécessaire :  
$$2 \times 1,5 \text{ kW} / 0,5 = 6,0 \text{ kW}$$
- Energie consommée :  $6,0 \text{ kW} \times 190 \text{ h} = 1140 \text{ kWh}$

Energie totale pour la propulsion = 3140 kWh



### 3.2.2 Energie consommée dans les réseaux électriques

L'énergie consommée dans les réseaux électriques a été estimée comme pour la mission n° 1.

		Transit vers site	Mission d'observation
Nombre d'heures	h	50	190
Energie consommée	kWh	849	3891

TOTAL RESEAUX : 4740 kWh

### 3.2.3 Bilan énergétique

- Transit en plongée :

Propulsion	2000
Réseaux	849
TOTAL	2849 kWh

- Mission d'observation :

Propulsion	1140
Réseaux hors instrumentation	3891
Instrumentation (estimation) 5 kW en continu pendant l'observation	950
TOTAL	5981 kWh

Besoin total d'énergie pour la mission n° 2 : 8830 kWh

### 3.3 FOURNITURE D'ENERGIE, OXYGENE MOTEUR

#### 3.3.1 Besoins en oxygène moteur

Ils s'estiment comme pour la mission n° 1.

La demande totale d'énergie correspond à :

$$8830 \text{ kWh} \times 0,980 \text{ kg} = 8654 \text{ kg d'O}_2$$

#### 3.3.2 Stockage de l'oxygène moteur

Cette quantité est stockée :

- Dans le système cryogénique qui peut délivrer 2950 kg par réservoir soit 5900 kg
- Pour le restant, soit 2754 kg, dans les stockages haute pression.

Cette dernière quantité représente un stockage initial de  $2172 \text{ Nm}^3$  compte tenu d'une température moyenne de changement de  $10^\circ \text{ C}$  et d'une pression minimale d'admission de 27 bars absolus.

Cette quantité peut se stocker de la façon suivante :

- Groupe des lots I, J et H	Capacité $1088 \text{ Nm}^3$
- Groupe des lots E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> et G	Capacité $1200 \text{ Nm}^3$
soit au total	<hr/> $2288 \text{ Nm}^3$

(Cf. tableau affectation des stockages de gaz en spécification 07.00 sur le stockage des gaz).



3.4

#### REPARTITION DES STOCKAGES DE GAZ RESPIRABLES

Les stockages de gaz respirables se bornent pour la mission n° 2 au stockage de l'oxygène respiratoire. Les besoins sont largement couverts par les fonds des bouteilles  $O_2$  moteur. Seuls sont à considérer les stocks secours obligatoires et le stock de départ.

Affectation : lots K et L capacité totale :  $256 \text{ Nm}^3$ .

3.5

#### CONCLUSIONS DU BILAN ENERGIE DE LA MISSION N° 2

La quantité d'énergie embarquable à bord du sous-marin permet de réaliser la mission n° 2 en mettant en oeuvre une quantité d'instruments appréciable.

Le bilan énergétique global fait apparaître un excédant énergétique d'environ 1500 kWh.