

BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2022

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Ingénierie, innovation et développement durable ARCHITECTURE ET CONSTRUCTION

Durée de l'épreuve : 4 heures

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue » est autorisé.*

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte 33 pages numérotées de 1/33 à 33/33.

Constitution du sujet :

Partie commune (durée indicative 2h30)	12 points
Partie spécifique (durée indicative 1h30)	8 points

❖ La partie commune comporte 5 parties dont 2 au choix.

À traiter obligatoirement	À traiter au choix
Partie commune : <ul style="list-style-type: none">• partie 1• partie 2• partie 3	Partie commune : <ul style="list-style-type: none">• soit la partie 4• soit la partie 5 <p>Une seule de ces 2 parties doit être traitée.</p>

❖ La partie spécifique comporte 4 parties qui sont toutes à traiter obligatoirement.

Tous les documents réponses sont à rendre avec la copie.

PARTIE COMMUNE (12 points)

Energy Observer



- **Présentation de l'étude et questionnaire**..... pages 3 à 9
- **Documents techniques**..... pages 10 à 18
- **Documents réponses** pages 19 à 22

Mise en situation

« Energy Observer » est le premier navire à hydrogène visant l'autonomie énergétique. Il ne dégage aucune émission de gaz à effet de serre ni particule fine lors de ses trajets. Cet ancien bateau de course a été reconditionné en navire du futur à propulsion électrique fonctionnant grâce à un mix d'énergies renouvelables (eau, vent, soleil) et un système de production d'hydrogène décarboné à partir de l'eau de mer.

L'étude et la conception des technologies embarquées ont été réalisées par le Centre d'Étude Atomique (CEA) de Grenoble. Le centre CEA de Grenoble consacre l'essentiel de ses recherches au développement des nouvelles technologies, dans les domaines de l'énergie, de la santé, de l'information et de la communication.

Ce navire permet d'éprouver et optimiser les nouvelles technologies à bord de son laboratoire flottant en milieu extrême. Les expériences sur le terrain doivent permettre de concevoir des applications futures et à grande échelle dans le domaine de la navigation maritime.

Les nouveaux enjeux écologiques pour le transport maritime

Le transport maritime achemine plus de 90% des marchandises dans le monde et plusieurs millions de personnes chaque année. Les gaz d'échappement des navires sont une source importante d'émission de gaz à effet de serre et de particules fines.

L'Organisation Maritime Internationale a approuvé en avril 2018 une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) produites par les activités du transport maritime. L'objectif est de réduire les émissions annuelles totales de GES d'au moins 50 % d'ici à 2050.

L'hydrogène comme vecteur d'énergie propre ?

Actuellement dans le monde, 95% de l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles.

Le défi : développer une production d'hydrogène propre, à partir de l'électrolyse de l'eau ou grâce aux énergies renouvelables. On parle alors d'hydrogène « vert ». L'hydrogène permet de stocker à long terme les surplus d'énergies renouvelables pour pouvoir les réutiliser plus tard.

L'hydrogène « vert » peut être un moyen de répondre à un nouvel enjeu environnemental et de santé publique lors des liaisons fluviales et maritimes. Il permet de réduire les émissions de CO₂ et de diminuer le niveau sonore des navires en circulation.

Pour les liaisons fluviales et maritimes, le passage à un mode hybride batterie / hydrogène permet d'accroître les performances et d'assurer la continuité du service public rendu, tout en préservant la réduction sonore et l'absence de polluants atmosphériques.

Travail demandé

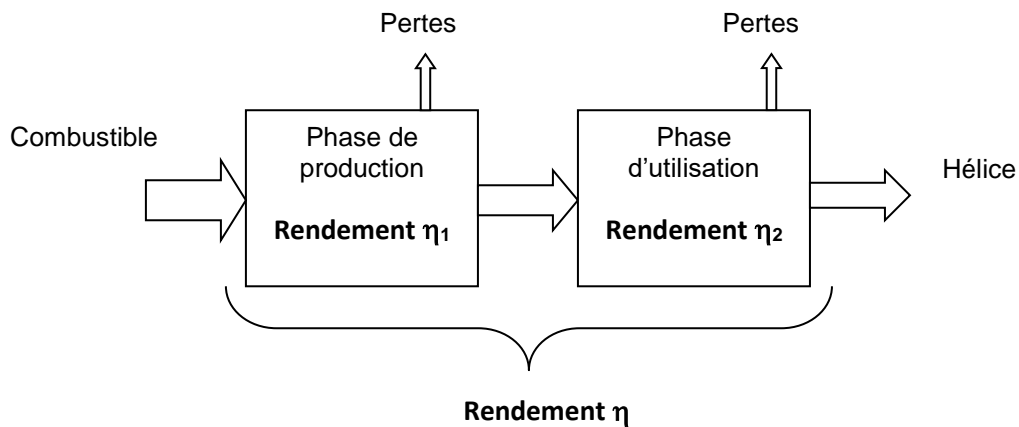
Partie 1 : quel est l'intérêt environnemental d'un navire à hydrogène ?

- Question 1.1 | **Indiquer** au moins deux raisons qui justifient l'intérêt environnemental de ce projet.
- Question 1.2 | **Expliquer** en quoi l'hydrogène « vert » pourrait être une solution d'avenir pour réduire l'impact environnemental du transport maritime.
- Question 1.3 | À partir du **DT1**, **indiquer** les quatre éléments techniques à bord du bateau permettant de produire de l'énergie électrique.
DT1
- Question 1.4 | On donne les différents éléments technologiques qui participent à la chaîne de production d'hydrogène:
DT1, DT2
DR1
- purificateur
 - électrolyseur
 - dessalinisateur
 - réservoirs
 - compresseur
- Compléter**, sur le document réponse **DR1**, les noms de ces éléments en fonction de leur rôle dans la chaîne de production d'hydrogène.
- Question 1.5 | **Conclure** sur la capacité de ce bateau à naviguer sans émission de gaz à effet de serre.

Partie 2 : quel est le meilleur combustible pour propulser le bateau ?

On s'intéresse ici au bilan carbone et au bilan énergétique de plusieurs combustibles sur une phase de cycles de vie (production jusqu'à l'utilisation).

La chaîne énergétique pour un combustible peut être schématisée de la manière suivante :



Question 2.1 | **Calculer** dans le DR2 le rendement global (production et utilisation) pour l'hydrogène obtenu par électrolyse.

DR2

Question 2.2 | **Montrer** en quoi l'hydrogène obtenu à partir de la technique de l'électrolyse est actuellement une solution d'avenir, à partir du DT3 et du calcul précédent.

DT3

Partie 3 : la capacité de stockage d'hydrogène du bateau est-elle suffisante pour assurer deux jours de navigation ?

L'étude précédente a montré que l'hydrogène vert est un combustible intéressant pour la propulsion du fret maritime. Pour utiliser une pile à combustible en tant que source d'énergie, il est nécessaire d'utiliser un système de propulsion électrique pour les navires.

Pour effectuer un voyage, il faut vérifier l'exigence 1.1 du document **DT4**.

Energy Observer part pour un voyage d'essais entre St Tropez et Minorque, décrit dans le document **DT5**.

La première phase de fonctionnement (jusqu'au coucher de soleil) se déroule de jour et il n'y a aucun vent. Le bateau fonctionne sur ses batteries avec l'apport d'énergie extérieure due à l'ensoleillement. Il s'agit du fonctionnement « éco » pendant lequel le système ne produit pas d'hydrogène.

Question 3.1 | **Repérer**, en entourant les flèches correspondantes, les flux d'énergie en jeu lors de cette phase de fonctionnement sur le document réponse **DR3**.
DR3

Question 3.2 | **Compléter** sur le **DR4** le tableau descriptif de cette chaîne de puissance à l'aide des éléments de la question précédente.
DT2
DR4

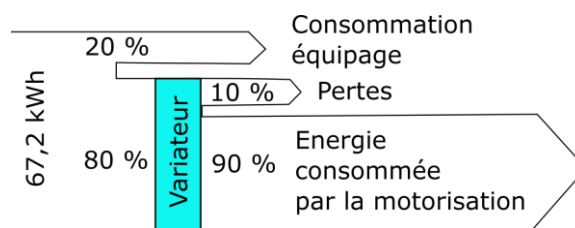
Après le coucher du soleil et jusqu'à 3 heures du matin, le bateau est propulsé uniquement à l'aide de l'énergie des batteries. Il s'agit de la deuxième phase de fonctionnement décrite dans **DR5**.

Question 3.3 | **Repérer**, en entourant les flèches correspondantes, les flux d'énergie en jeu lors de cette phase de fonctionnement sur le document réponse **DR5**.
DR5

Nous rappelons que la capacité de la batterie est de 112 kW·h.

Question 3.4 | **Calculer** la quantité d'énergie en kW·h cédée par les batteries.
DT5

Les besoins en énergie pour l'activité du navire et la vie à bord (consommation de l'équipage) correspondent à 20% de l'énergie produite par les batteries.



Question 3.5 | À partir du diagramme précédent, **calculer** l'énergie effectivement utilisée par la motorisation pour la propulsion.

Question 3.6 | **Calculer** en heure la durée de cette deuxième phase de navigation.
DT5 | **En déduire** la puissance moyenne dissipée utilisée par le moteur pour maintenir cette allure.

Question 3.7 | À partir du **DT2** et **DT4**, **justifier** l'exigence « Mode Eco ».
DT4

La puissance moyenne dissipée en mode « éco » est de 10,8 kW.

Question 3.8 | **Calculer**, sur une durée de 2 jours, l'énergie totale consommée par le bateau.

Question 3.9 | **Relever** sur le **DT5** l'énergie totale consommée lors de la navigation de St Tropez à Minorque.
DT5 | **Commenter** le résultat.

La quantité d'énergie stockée dans 1 kg de H₂ est de 33 kW·h.

Question 3.10 | **Calculer** la masse en kg d'hydrogène nécessaire pour alimenter en énergie un trajet de deux jours sans vent et sans ensoleillement (le bateau est uniquement propulsé par l'hydrogène).
DT6

Question 3.11 | **Lire** sur le diagramme de définition des blocs (bdd) du DT2 la capacité et le nombre de réservoirs à hydrogène sur le bateau. **En déduire** la masse totale d'hydrogène embarquée.
DT2

Question 3.12 | **Conclure** sur la faisabilité du trajet en deux jours uniquement avec un apport d'hydrogène.

Partie 4 : comment stocker l'hydrogène sur le bateau ?

L'hydrogène est stocké dans des réservoirs sous haute pression (35 MPa ou 350 bars).

Question 4.1 | **Indiquer** la raison pratique qui justifie le stockage sous haute pression.
DT7

Question 4.2 | **Justifier** le choix qui a été fait pour le détendeur (module inox) sachant que la pression d'utilisation est de 2 bars.
DT6 et DT8

Afin de choisir un réservoir pour stocker cette quantité d'hydrogène trois simulations ont été réalisées. Une simulation avec un réservoir en acier allié de 6 mm d'épaisseur, une autre avec de l'acier allié de 11 mm et une dernière avec un composite époxy / fibre de carbone de 8 mm. Les résultats de ces simulations sont donnés **DT9**.

Question 4.3

DT9

Parmi les trois réservoirs, **indiquer** en justifiant ceux qui peuvent convenir.

Parmi les réservoirs qui conviennent, le réservoir le plus léger est retenu. Ces réservoirs ont un volume extérieur identique.

Question 4.4

DT9

Choisir en justifiant le réservoir le mieux adapté.

Partie 5 : comment maintenir le cap du bateau malgré les éléments extérieurs ?

Naviguer consiste à déterminer une route pour aller d'un point à un autre, en évitant les dangers et en tenant compte de l'environnement météorologique (les vents) et océanographique (les courants).

Question 5.1

À l'aide du texte précédent, **identifier** les deux paramètres extérieurs au bateau qui peuvent modifier sa position en navigation.

L'étude suivante porte sur le parcours d'Energy Observer entre Saint Tropez et Minorque.

D'après les lois de l'hydrodynamique, on peut approximer la force due à l'eau qui s'oppose au déplacement du bateau par la formule : $F = k \cdot v^2$

- k une constante liée aux caractéristiques du bateau ;
- v la vitesse du bateau.

Question 5.2

En analysant la formule précédente, **expliquer** l'intérêt pour Energy Observer de naviguer à une vitesse faible ($10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

Étude de l'influence du courant et du vent sur le déplacement du bateau (voir DT10).

On considère que \vec{V}_{B1} représente le vecteur cap du bateau. Pour simplifier, on considère que les courants et le vent ont la même direction et le même sens, ils sont présentés par le vecteur « dérive » : \vec{D} .

On donne, dans le **DT10**, deux cas de figure représentant deux caps différents suivis par le bateau, et ce pour une dérive identique.

Question 5.3

DT10

Justifier dans quel cas le bateau pourrait atteindre Minorque, en tenant compte des représentations des vecteurs \vec{D} et \vec{V}_{B1} .

Afin d'assister le skipper dans le contrôle de la navigation, le bateau est équipé d'un pilote automatique. Il permet de diriger automatiquement le bateau afin que ce dernier suive la route (cap) préalablement définie.

Le système est composé de :

- un compas : mémorise le cap (direction) souhaité et mesure le cap suivi par le bateau ;
- une unité de commande électronique : calcule la différence entre le cap suivi et le cap mémorisé afin d'envoyer une consigne à l'actionneur ;
- un actionneur (vérin) : agit sur la barre pour repositionner le bateau sur sa route.

L'unité électronique fonctionne suivant l'algorithme fourni sur le **DR6**.

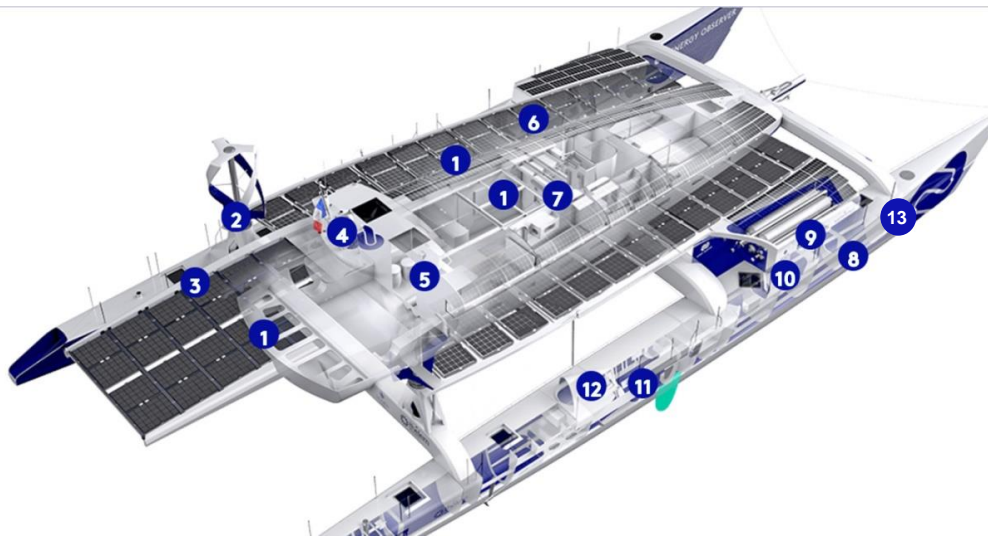
Question 5.4

DR6

Compléter l'algorithme, présent sur le **DR6**, avec les trois fonctions suivantes :

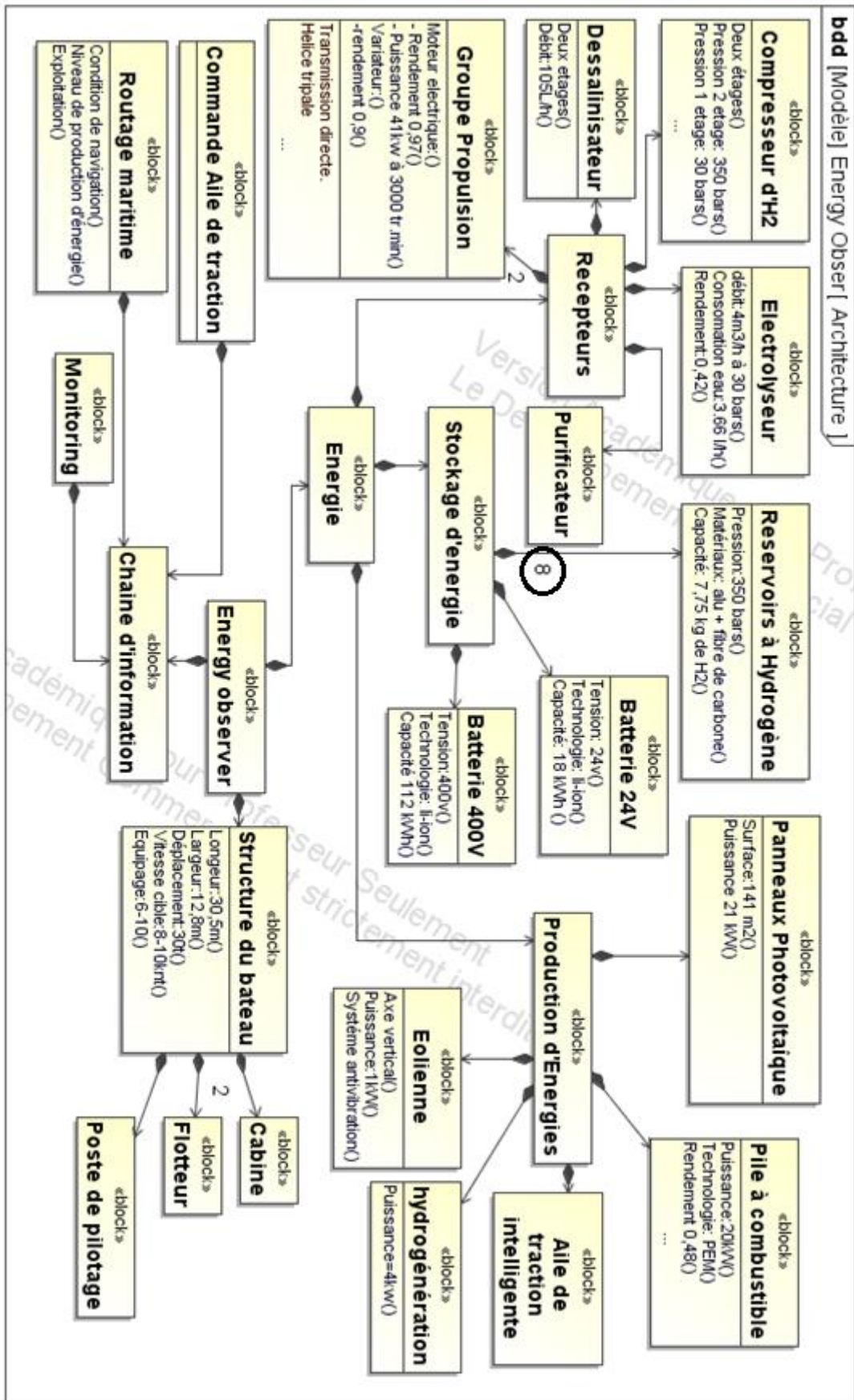
- Actionner le vérin du gouvernail pour tourner dans le sens horaire
- Différence = « Cap_souhaité » – « Cap_mesuré »
- Différence > 0

DT1 : caractéristiques techniques principales de « l'Energy Observer »



1	Panneaux photovoltaïques	Fournir de l'énergie électrique à partir du soleil
2	Éoliennes	Fournir de l'énergie électrique à partir du vent
3	Dessalinisateur	Produire de l'eau douce à partir de l'eau de mer
4	Logiciel de routage	Optimisation du plan de route liée aux différents paramètres de navigation (vent, vague, ensoleillement...) mais aussi aux différentes productions d'énergie à bord (ensoleillement, nébulosité, niveau d'hydrogène ...).
5	Monitoring	IHM (Interface Homme Machine) pour le suivi en temps réel des performances, gestion et optimisation des flux énergétiques, à bord et à distance.
6	Compresseur d'hydrogène	Compresser l'hydrogène pour le stocker dans des réservoirs.
7	Kit de traction intelligent	Cerf-volant automatisé destiné à augmenter la vitesse du bateau et réduire ses dépenses énergétiques.
8	Électrolyseur	Produire de l'hydrogène à partir de l'énergie électrique et de l'eau.
9	Réservoirs d'hydrogène	Stocker de l'énergie à long terme.
10	Pile à combustible	Générer de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké
11	Batteries Lithium-Ion	Stocker de l'énergie à court terme
12	Propulseur	2 moteurs électriques à haut rendement (97%), réversibles en hydrogénérateurs lors des navigations sous kite.
13	Purificateur	système de filtration qui vise à séparer l'eau des particules solides (résidus) en la faisant passer travers d'un milieu poreux

DT2 : diagramme de définition des blocs (BDD)



DT3 : bilan carbone de différents combustibles

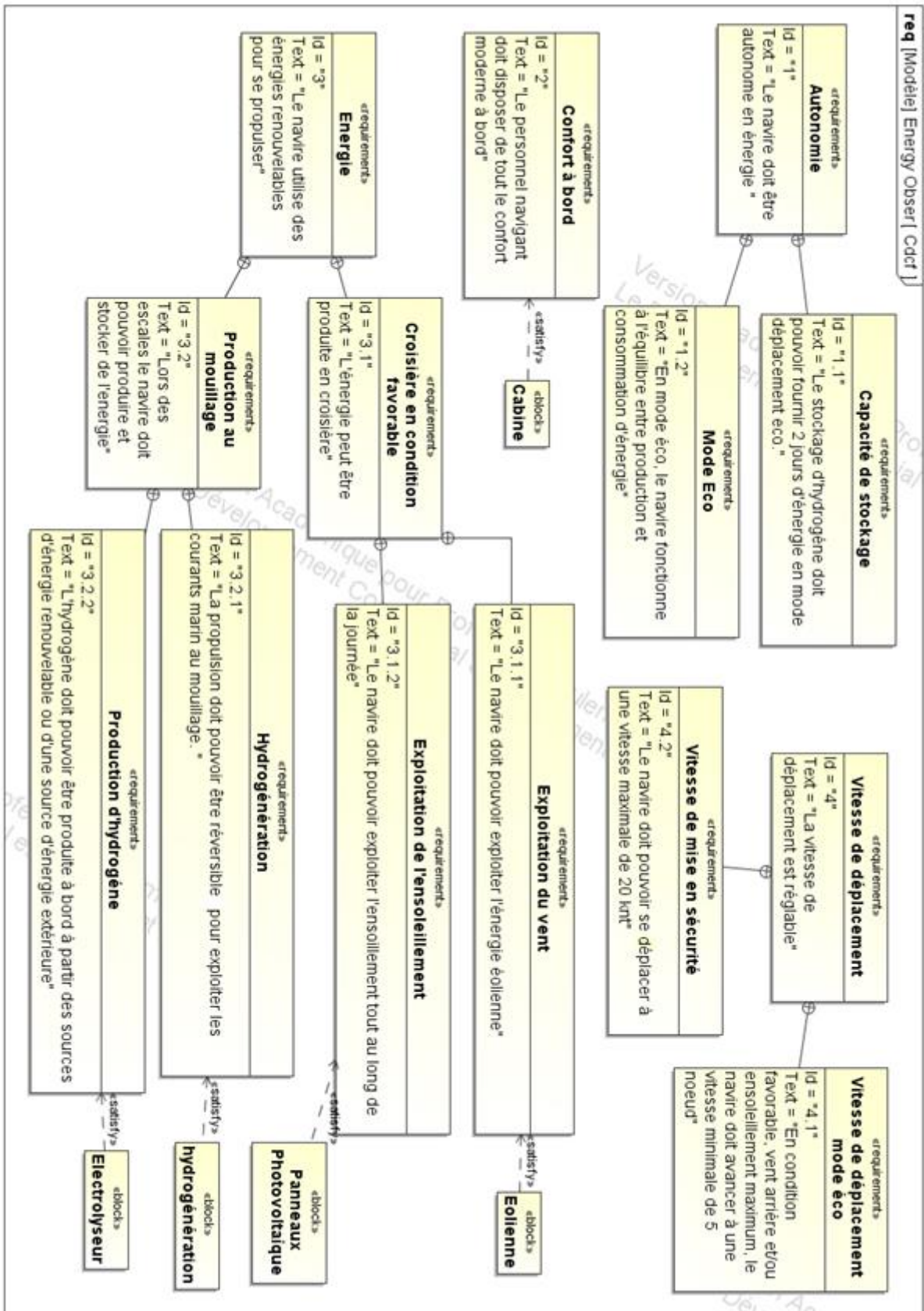
Combustible	Cycle de vie (Production jusqu'à l'utilisation)	Bilan CO ₂ (g CO ₂ /kW·h)		
		Production	Utilisation	Global
Fuel	Extraction puis raffinage	55	270	325
Gaz naturel	Extraction puis raffinage, gazéification et compression	40	200	240
Hydrogène	Reformage* du gaz naturel puis compression à 35 MPa	330	0	330
Hydrogène	Électrolyse** (électricité d'origine renouvelable) puis compression à 35 MPa	9	0	9

Source : « la pile à combustible – l'hydrogène et ses applications », Meziane Boudellal, Dunod et données internes CEA

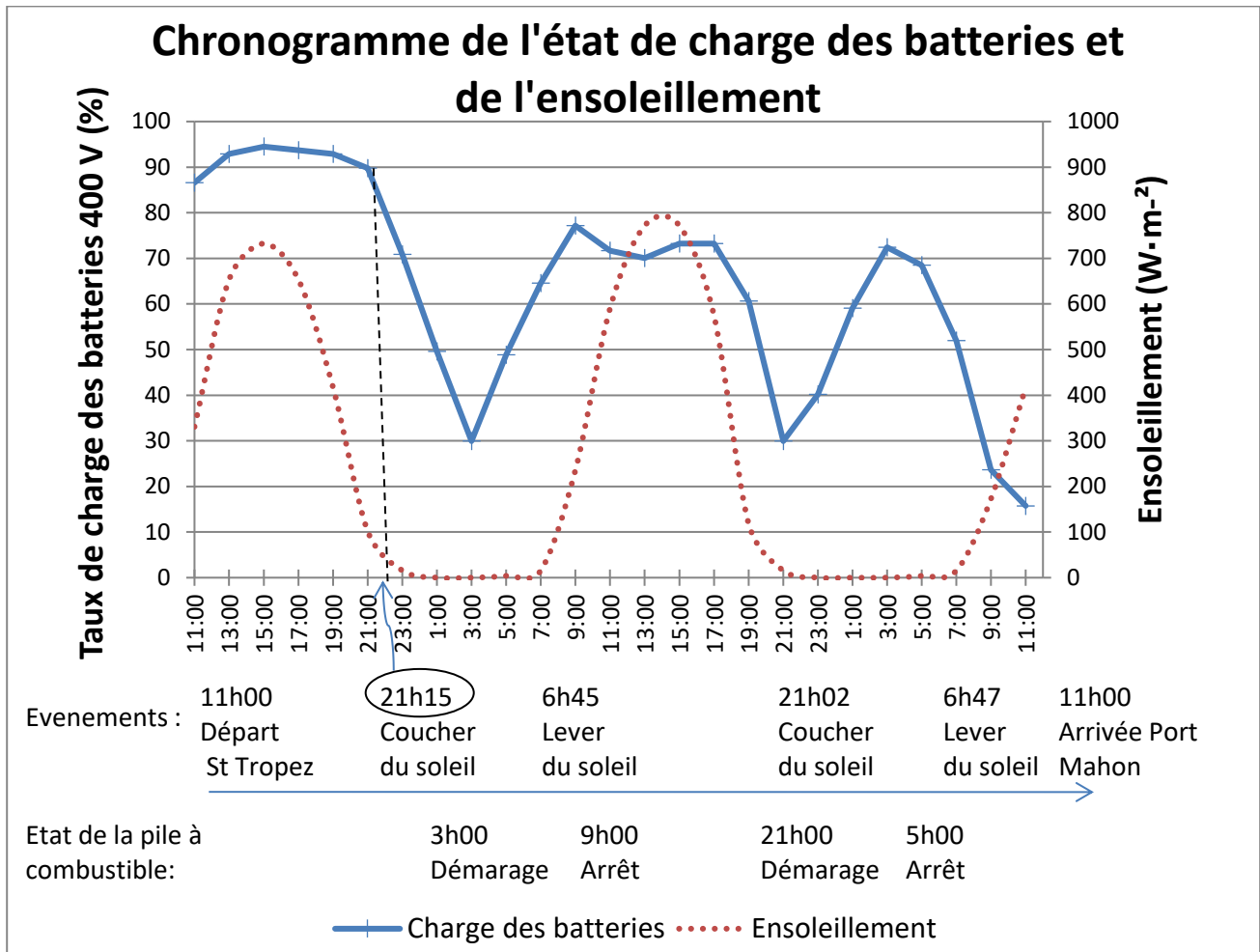
* Le **reformage** est une réaction chimique qui consiste à produire de l'hydrogène (H₂) à partir du méthane (CH₄) présent dans le gaz naturel.

** L'**électrolyse de l'eau** est un procédé **électrolytique** qui décompose l'eau en dioxygène (O₂) et hydrogène (H₂) avec l'aide d'un courant électrique.

DT4 : diagramme des exigences (partiel)



DT5 : bilan énergétique de la navigation St Tropez - Minorque



Bilan énergétique

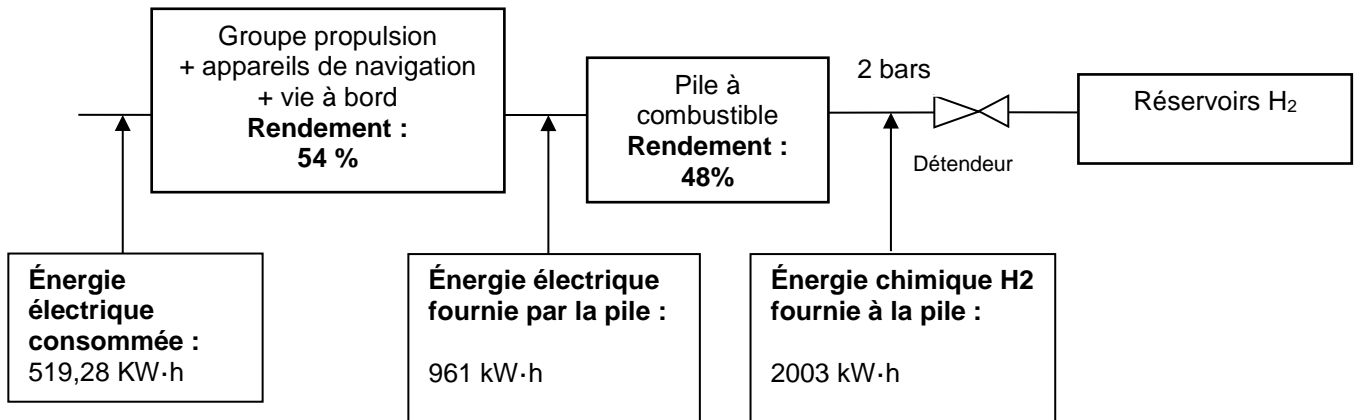
Production	
Panneaux photovoltaïques	198,6 kW·h
Éoliennes	0
Moteurs électriques réversibles	0
Apport Batteries	95,2 kW·h
Apport pile à combustible	277,43 kW·h
Total	519,29 kW·h

Consommation	
Propulsion électrique	474,14 kW·h
Vie à bord, instrument de navigation, etc...	97,15 kW·h
Chaîne de production d'hydrogène	0 kW·h
Total	519,28 kW·h

État de charge	
Taux de charge des batteries 400 V au départ	100 %
Taux de charge des batteries 400 V à l'arrivée	15 %
Taux de charge des réservoirs d'hydrogène au départ	88 %
Taux de charge des réservoirs d'hydrogène à l'arrivée	61 %

Performances	
Puissance solaire maximale atteinte	18 423 W
Puissance éolienne maximale atteinte	0 kW
Puissance hydrolienne maximale atteinte	0 kW

DT6 : chaîne d'énergie de la production d'hydrogène



DT7 : le stockage haute pression de l'hydrogène

L'hydrogène est le gaz le plus léger de tout l'univers: un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg à pression atmosphérique, il est donc environ 11 fois plus léger que l'air que nous respirons.

Il faut un volume d'environ 11 m³, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour seulement stocker 1 kg d'hydrogène. Il est donc indispensable d'augmenter sa densité ou masse volumique.

La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi à 20 MPa on obtient une densité de 14 kg·m⁻³ et à 70 MPa une densité de 42 kg·m⁻³ contre 0,090 kg·m⁻³ à pression et température normales.

À 70 MPa on peut alors stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

Spécifications

❑ Caractéristiques techniques

Classe de pression selon critères ANSI/ASME

B31.3

Pression d'entrée maxi:

Inox:415 bar

Laiton, aluminium:345 bar

Plages de réglage:0-3.5 / 0-10 /

..... 0-17 bar

Pression d'épreuve: 150% de la pression

..... d'entrée maxi

Niveau d'étanchéité:Sans bulle

Plage de température (ambiance et fluide):.....

..... -55 °C à +74 °C

Capacité de débit:Cv = 0.08

Couple de manoeuvre maxi: 2.26 Nm

❑ Pièces en contact avec le fluide

Corps: Inox 316, laiton, aluminium

Capot:Inox 300

Filtre 40 microns:Inox 316

Siège:CTFE

Joint o-ring: Buna-N

Membrane: Buna-N

Autres pièces:Inox 300

Pour tous autres matériaux ou modifications, nous contacter.

❑ Propreté: CGA 4.1 & ASTM G93

.....(niveau intermédiaire)

❑ Poids (sans manomètres):

Inox, laiton 1.4 kgs

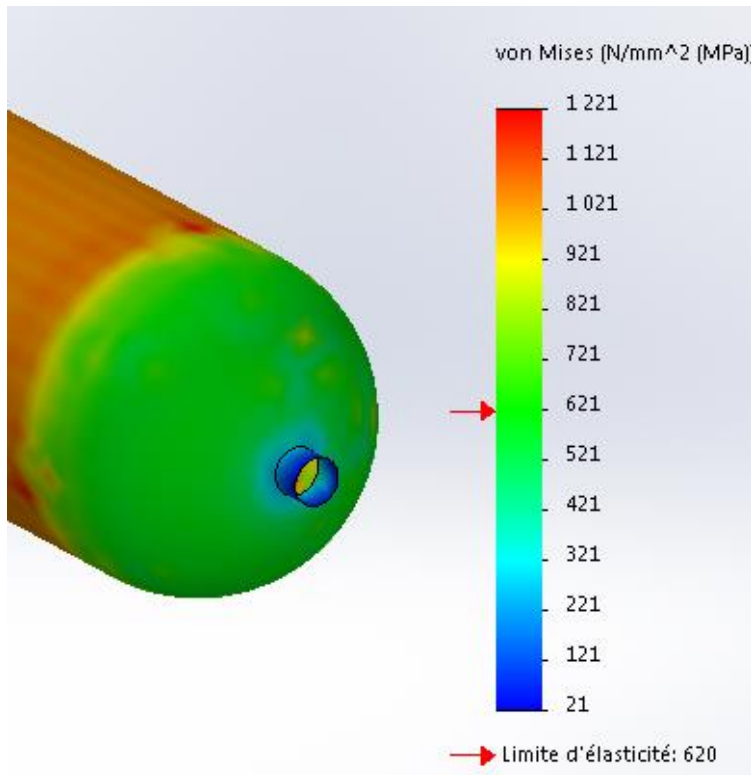
Téflon, Viton* and Vespel* est une marque déposée de Du Pont.*



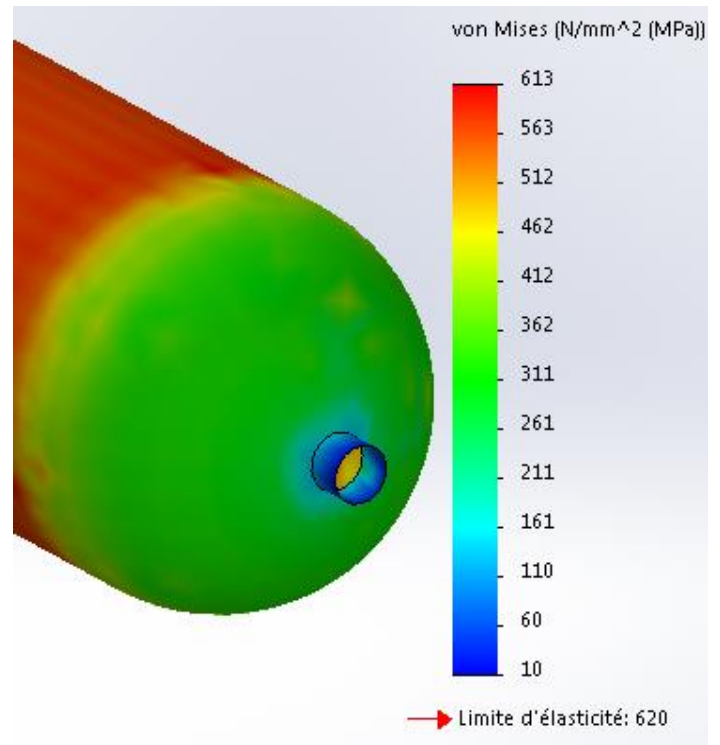
Caractéristiques & Avantages

- Régulation précise - technologie à membrane
- Nombreuses options en terme de raccords mécaniques et choix de pièces non métalliques
- Excellente répétabilité
- Poignée à faible couple de manoeuvre
- Montage panneau (collier inclus)
- Construction inox, laiton ou aluminium
- Ports manomètres disponibles
- Version fort débit, Cv = 0.24 (pour une pression d'entrée maximum de 207 bar)

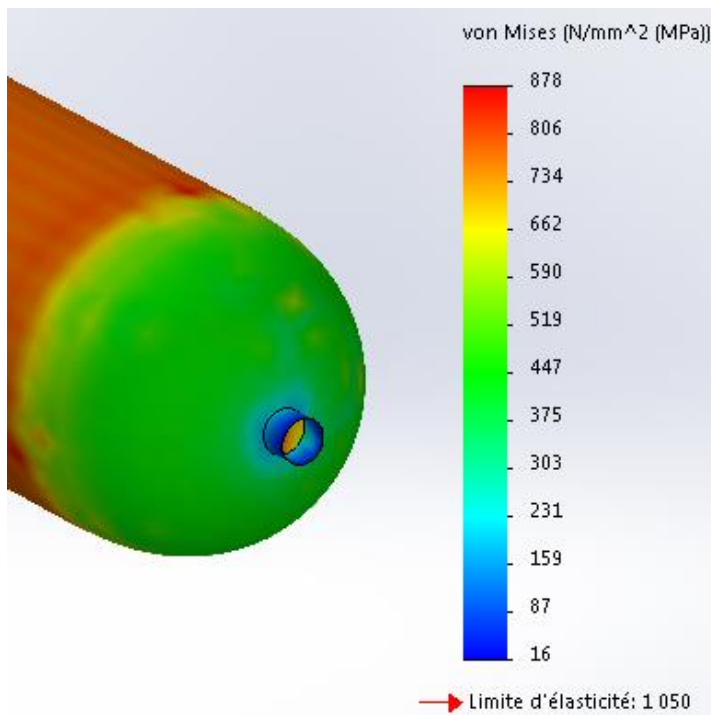
DT9 : choix du détendeur



6 mm Acier



11 mm Acier



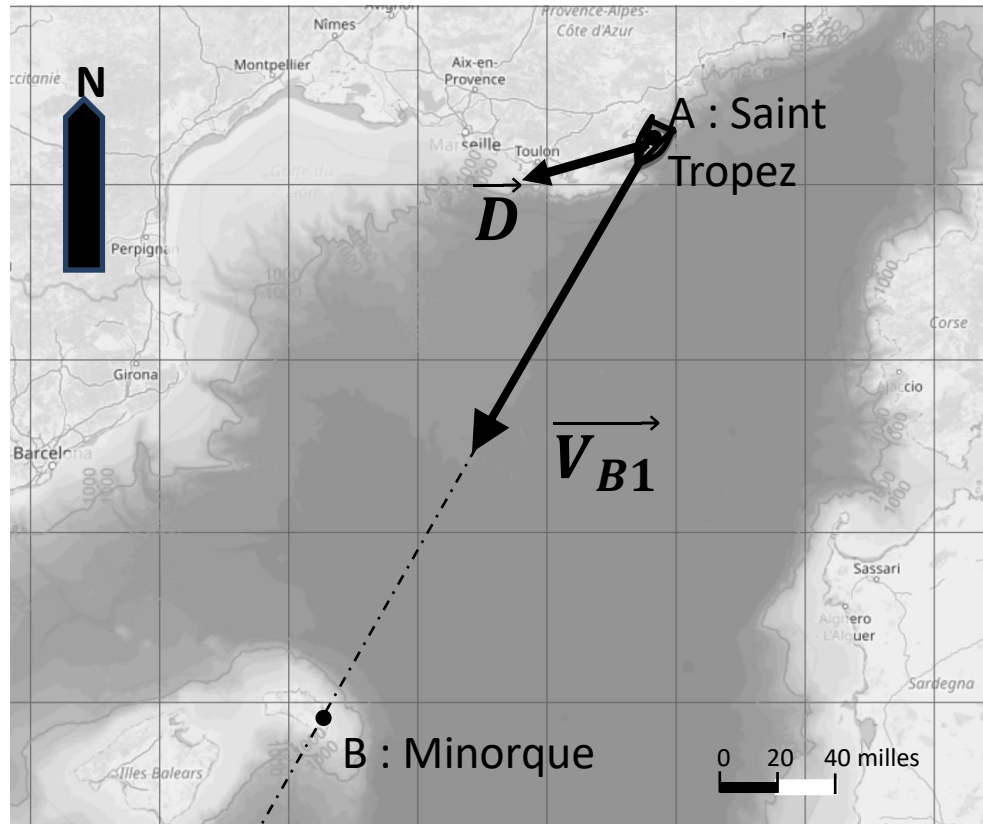
8 mm Composite Epoxy / fibre de carbone

Masse volumique acier :
7800 kg·m⁻³

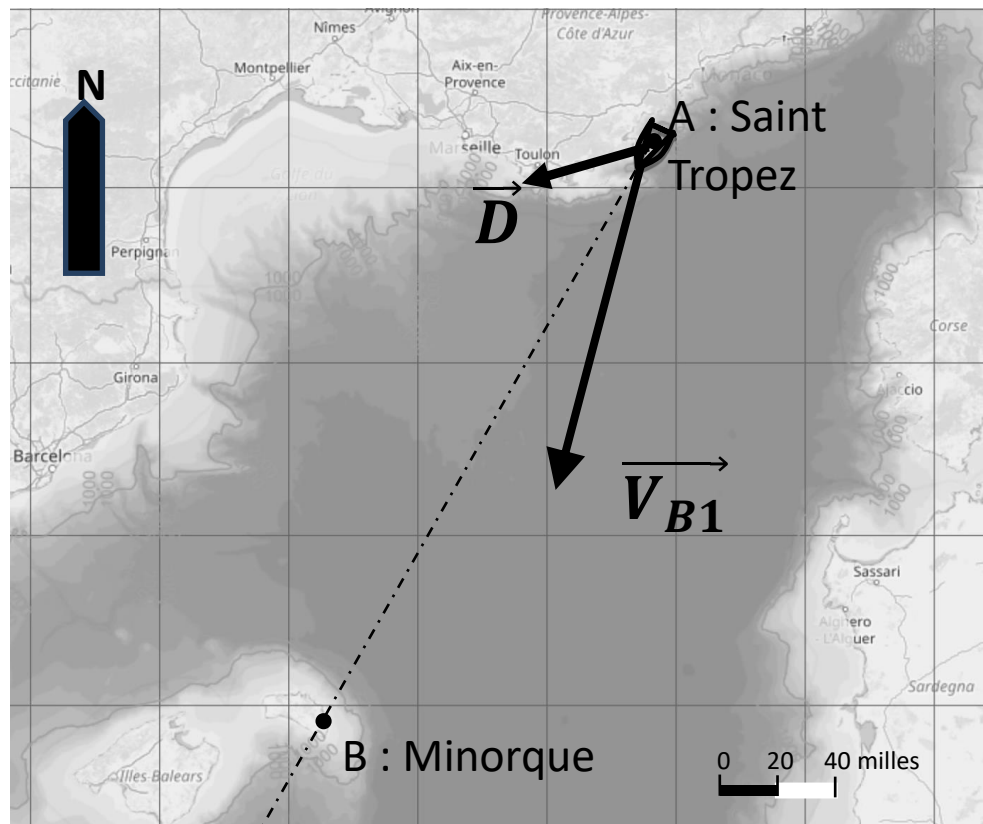
Masse Volumique Composite
Epoxy / fibre de carbone :
1600 kg·m⁻³

DT10 : déplacement du bateau

Cas de figure 1



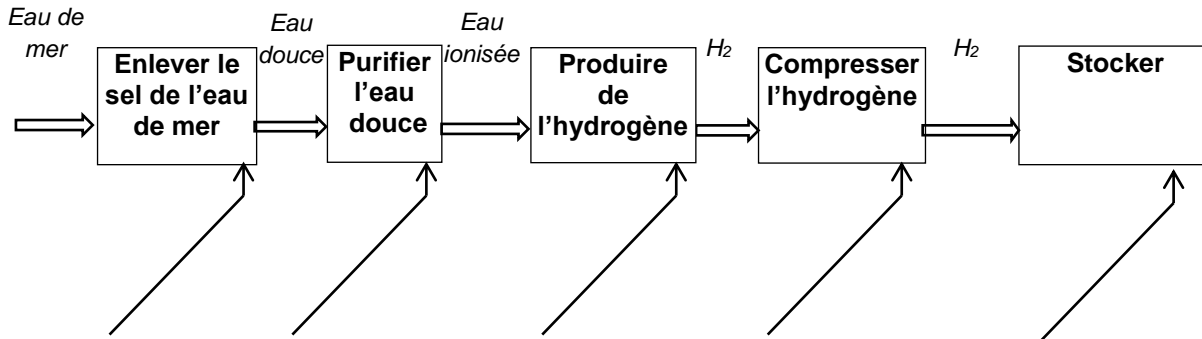
Cas de figure 2



DOCUMENT RÉPONSE DR1

Compléter, les noms des éléments technologiques en fonction de leur rôle dans la chaîne de production d'hydrogène

Chaîne de production d'hydrogène à bord de « Energy Observer »



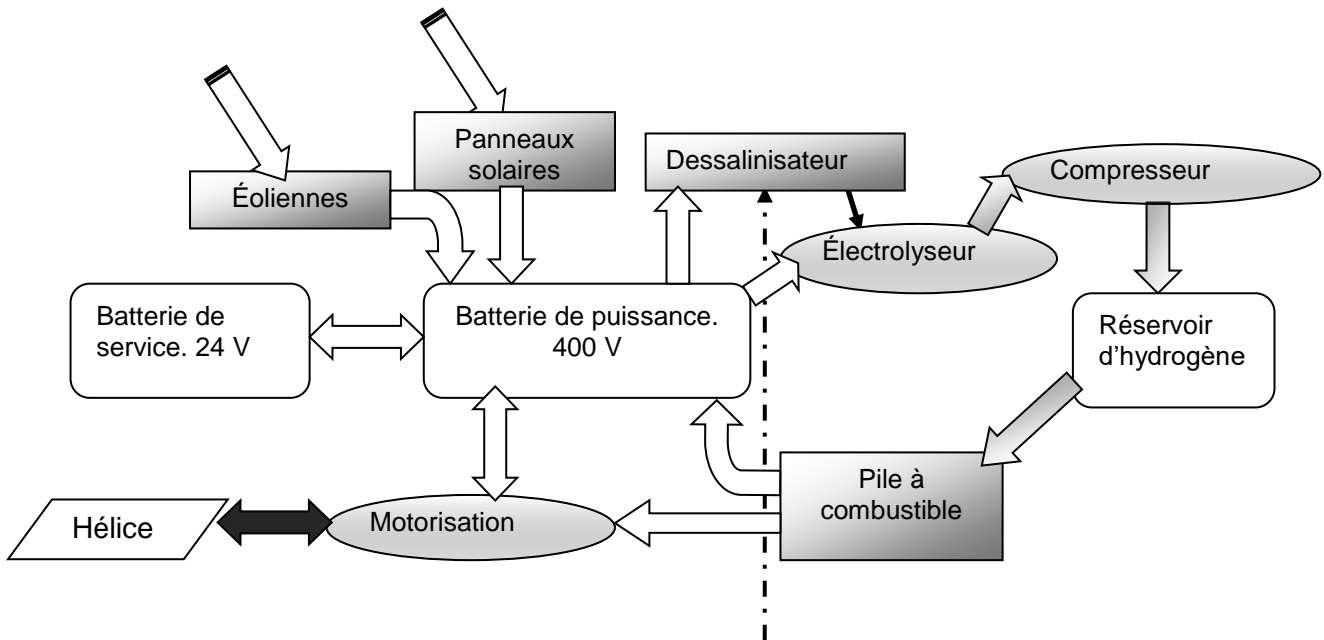
DOCUMENT RÉPONSE DR2

Combustible	Cycles de vie (Production jusqu'à l'utilisation)	Bilan net énergie		
		Production η_1	Utilisation η_2	Global η
Fuel	Extraction puis raffinage			24%
Gaz naturel	Extraction puis raffinage, gazéification et compression			16,4%
Hydrogène	Reformage du gaz naturel puis compression à 35MPa			25%
Hydrogène	Électrolyse (électricité d'origine renouvelable) puis compression à 35 MPa	65%	44%	

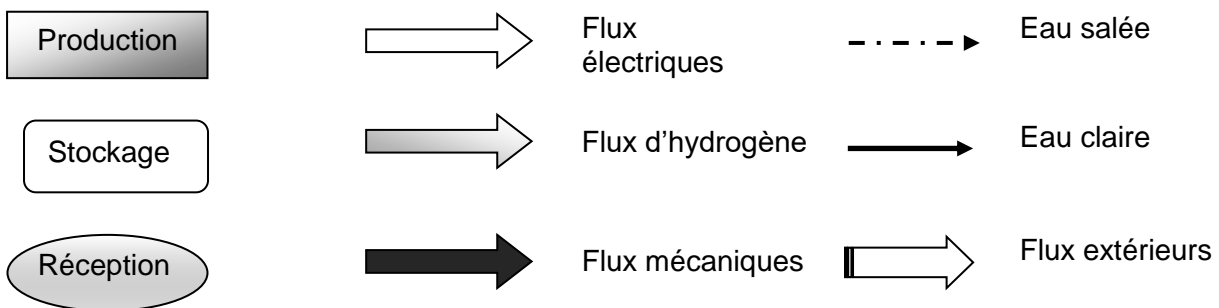
Source : « la pile à combustible – l'hydrogène et ses applications », Meziane Boudellal, Dunod et données internes CEA

DOCUMENT RÉPONSE DR3

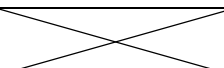
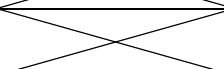
Flux d'énergie lors d'un déplacement sur panneau solaire.



Légendes :



DOCUMENT RÉPONSE DR4

Fonction	Sous système	Type d'énergie en entrée	Type d'énergie en sortie	Rendement
Produire		Rayonnement solaire		
Alimenter		Chimique		
Distribuer	Variateur	Électrique	Électrique	0,9
Convertir		Électrique		
Agir		Mécanique	Hydraulique	0,6

DOCUMENT RÉPONSE DR5

Flux d'énergie lors d'un déplacement sur batterie (fonctionnement normal).

