



MINISTÈRES
ÉDUCATION
JEUNESSE
SPORTS
ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
RECHERCHE

Liberté
Égalité
Fraternité

Académie de Grenoble

LYCEE DES METIERS LA PLÉIADE

Pont de Cheruy

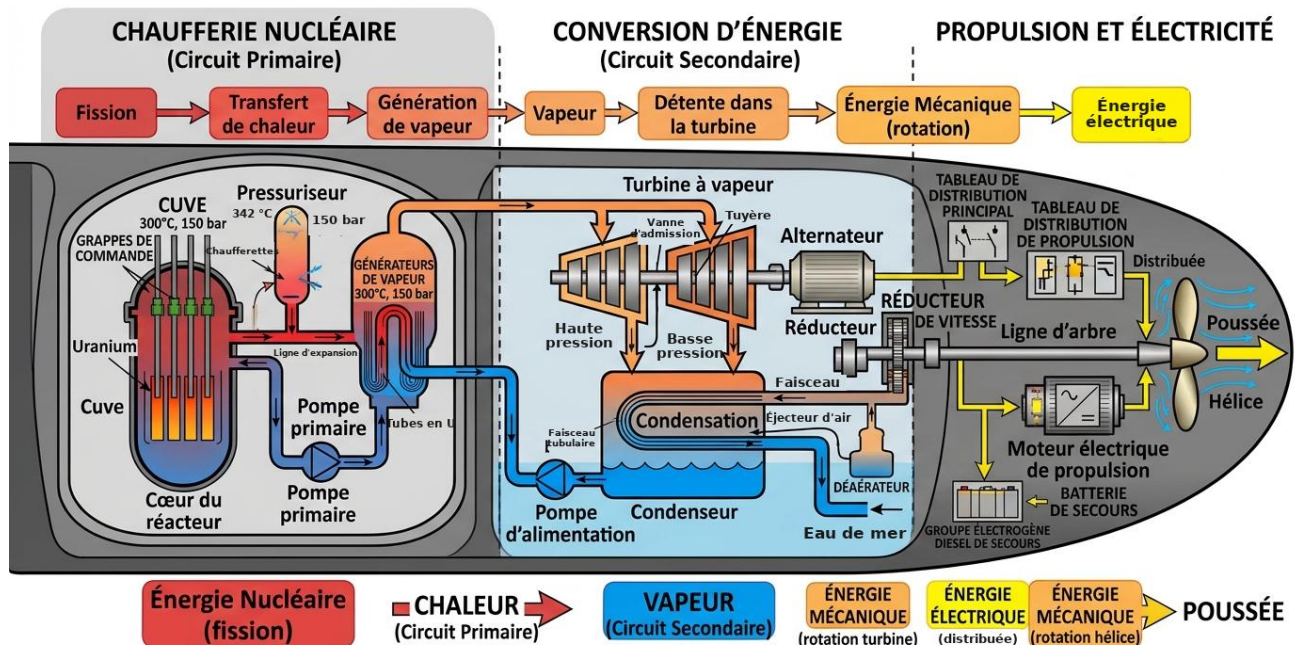


Propulsion nucléaire navale De l'atome à l'hélice

Terminale AC – ITEC – EE

la chaîne d'énergie de la fission de l'uranium à la pompe-hélice

Propulsion nucléaire d'un sous-marin d'attaque — principe de fonctionnement



Terminale	Propulsion nucléaire navale		Cours
Objectifs :	▪ Présenter le programme Barracuda et le sous-marin nucléaire d'attaque Suffren : missions, histoire, acteurs. ▪ Expliquer le fonctionnement d'une chaufferie nucléaire : fission, cœur, circuit primaire, pressuriseur, générateur de vapeur. ▪ Suivre la conversion de l'énergie de la vapeur jusqu'à la pompe-hélice : turbine, condenseur, réducteur, ligne d'arbre. ▪ Calculer puissances, couples, rendements, intensités et énergies sur une chaîne de propulsion hybride.		
Compétences visées	Programme de 2I2D (ingénierie, innovation et développement durable), classe terminale STI2D : arrêté du 17 janvier 2019 – BO spécial n°1 du 22 janvier 2019 (NOR MENE1901591A), annexe 1. Chapitre du tronc commun aux quatre enseignements (AC, ITEC, EE, SIN). Compétences du programme (BO) : C01.3 Justifier les solutions constructives d'un produit au regard des performances environnementales et estimer leur impact sur l'efficacité globale. → <i>rendements, pertes, source froide, rendement global</i> C03.1 Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un produit ainsi que ses entrées/sorties. → <i>fonctions alimenter, distribuer, convertir, transmettre de la chaîne de propulsion</i> C02.1 Décoder le cahier des charges d'un produit, participer, si besoin, à sa modification. → <i>exigences du programme Barracuda (CDC du TP 04)</i>		
Connaissances associées (BO)	2.3.1 à 2.3.3 Chaînes de puissance : typologie, stockage d'énergie, conversion de puissance 3.3 Comportement énergétique des produits : conservation de l'énergie, pertes et rendements, sources d'énergie, bilan énergétique		
Durée	3h de cours		
Discipline	AC – ITEC – EE		
Notation Pronote	Évaluation du TP associé (DM 20 points + SolidWorks 20 points)	—	
Coefficient	1		

CHAPITRE

03

COURS · TERMINALE STI2D · 212D

Propulsion nucléaire navale

De l'atome d'uranium à la pompe-hélice du sous-marin Suffren

LE FIL ROUGE DU CHAPITRE

● Uranium 235 <i>noyau fissile</i>	● Fission <i>chaleur</i>	● Circuit primaire <i>eau à 150 bar</i>	● Générateur <i>de vapeur</i>	● Turbine <i>6 000 tr/min</i>	● Réducteur <i>200 tr/min</i>	● Ligne d'arbre <i>couple</i>	● Pompe-hélice <i>poussée</i>
---------------------------------------	-----------------------------	---	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

LA QUESTION DU CHAPITRE

« Comment quelques kilogrammes d'uranium font-ils avancer pendant dix ans, en plongée et en silence, un sous-marin de 5 300 tonnes ? »

JE SERAI CAPABLE DE...

- ☐ Présenter le **programme Barracuda** et expliquer pourquoi un sous-marin d'attaque utilise la propulsion nucléaire.
- ☐ Expliquer le rôle du **cœur**, du **pressuriseur**, du **générateur de vapeur**, de la **turbine** et du **condenseur**.
- ☐ Calculer une puissance thermique $P = q_m \times c \times \Delta T$, un **rendement** et un **rendement global**.
- ☐ Calculer une **vitesse angulaire**, un **couple**, un **rapport de réduction** et l'effort sur une **vis de bride**.
- ☐ Utiliser $P = F \times v$, la **loi du cube** et convertir des **nœuds** en m/s.
- ☐ Calculer une **intensité en triphasé**, l'énergie d'une **batterie** et une **autonomie**.

Cochez chaque case quand la compétence est acquise.

AU PROGRAMME

- I Le programme Barracuda**
les SNA · du Rubis au Suffren · pourquoi le nucléaire sous l'eau
- II Produire la chaleur : la chaufferie**
fission · cœur et pilotage · circuit primaire et pressuriseur
- III Convertir : de la chaleur au mouvement**
générateur de vapeur · cycle eau-vapeur · turbine
- IV Transmettre : du réducteur à la pompe-hélice**
réducteur · ligne d'arbre et brides · pompe-hélice
- V Trois modes de propulsion et le bilan**
modes · loi du cube · électricité de bord · rendement global
- VI Je m'entraîne**
formulaire · quiz · exercice d'entraînement · synthèse

PARTIE I

Le programme Barracuda

Un **sous-marin nucléaire d'attaque** (SNA) est un sous-marin dont la **propulsion** est nucléaire mais dont l'**armement** est classique. La France en remplace six, de type **Rubis**, par six sous-marins de type **Suffren** : c'est le **programme Barracuda**, conduit par la **DGA** avec le **CEA**. **Naval Group** construit les sous-marins à Cherbourg et **TechnicAtome** conçoit leur chaufferie nucléaire.

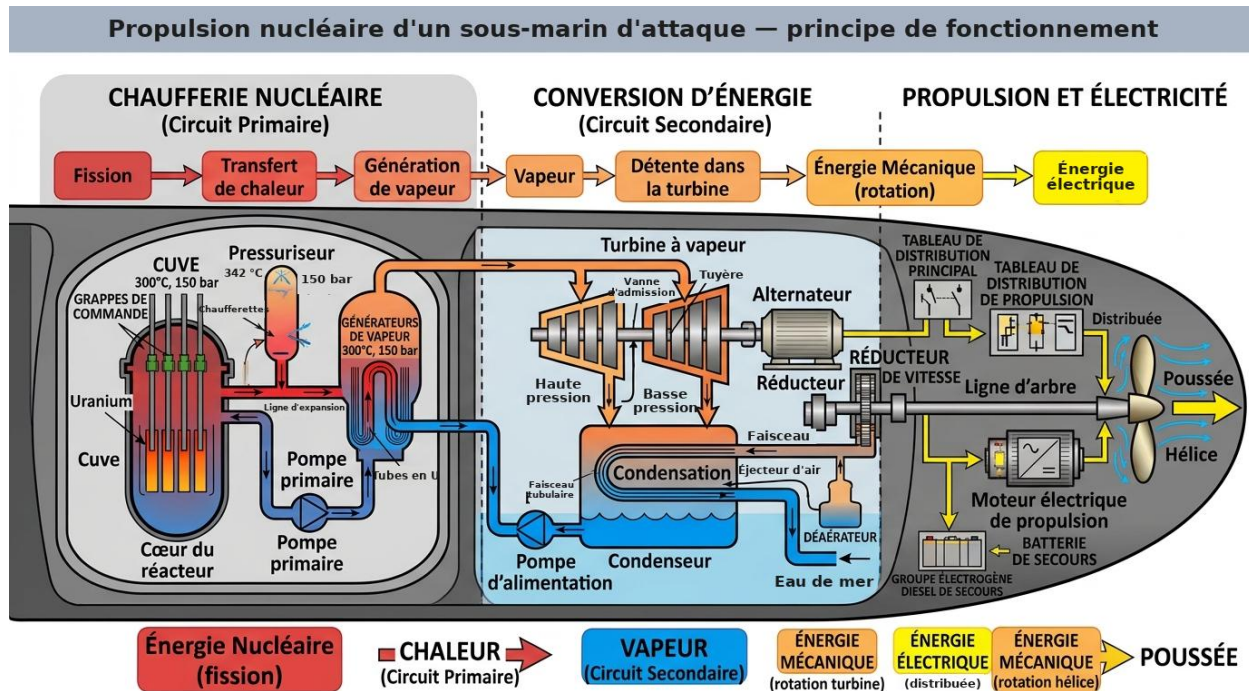


FIG. 1 Vue d'ensemble de la propulsion nucléaire d'un SNA (schéma de principe, sans échelle).

01 À quoi sert un sous-marin nucléaire d'attaque ?

Un SNA est un navire de combat polyvalent. Ses missions principales :

- **Protéger** les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) et le groupe aéronaval du porte-avions ;
- **Recueillir du renseignement** au plus près des côtes et des flottes adverses, sans être détecté ;
- **Lutter** contre les sous-marins et les navires de surface (torpilles F21, missiles Exocet SM39) ;
- **Frapper vers la terre** avec des missiles de croisière navals (MdCN) et **déposer des forces spéciales**.

À RETENIR

Nucléaire pour avancer, classique pour combattre

Sur un SNA, l'énergie nucléaire sert uniquement à **produire de la chaleur** pour la propulsion et l'électricité de bord. Il ne faut pas le confondre avec un **SNLE**, dont la mission est la dissuasion nucléaire.

02 Du Rubis au Suffren

Le Suffren est plus long, plus lourd et plus endurant que le Rubis qu'il remplace. Son cœur nucléaire dure deux fois plus longtemps et sa propulsion est **hybride** : turbine à vapeur pour la vitesse, moteur électrique pour la discrétion.

CARACTÉRISTIQUE	SNA TYPE RUBIS	SNA TYPE SUFFREN
Longueur / diamètre	≈ 74 m / 7,6 m	99 m / 8,8 m
Déplacement en plongée	≈ 2 600 t	≈ 5 300 t
Équipage	≈ 70 marins	63 marins
Vitesse maximale en plongée	plus de 25 nœuds	plus de 25 nœuds
Durée de vie du cœur	≈ 5 ans	≈ 10 ans
Propulsion	turbo-électrique, hélice	hybride, pompe-hélice

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Des sous-marins et des réacteurs

DATE	QUI / QUOI ?	CE QUI A CHANGÉ
1955	USS Nautilus (États-Unis)	Premier sous-marin à propulsion nucléaire : il navigue en plongée sans remonter respirer.
1964	Prototype à terre (Cadarache)	Premier réacteur français de propulsion navale, testé à terre avant d'équiper un navire.
1971	Le Redoutable (France)	Premier SNLE français : la dissuasion nucléaire passe sous la mer.
1983	Rubis (France)	Premier SNA français ; six sous-marins de ce type seront construits jusqu'en 1993.
2020	Suffren (France)	Premier SNA du programme Barracuda, livré à la Marine nationale en novembre 2020.
2023-2024	Duguay-Trouin, Tourville	Deuxième et troisième SNA Barracuda ; trois autres sont prévus d'ici 2030.

PIÈGE À ÉVITER

Le nœud n'est pas un kilomètre par heure

- Le **nœud** est l'unité de vitesse de la marine : **1 nœud = 1 mille marin par heure = 1 852 m/h**.
- 25 nœuds ≈ 46 km/h, et non 25 km/h. Avant tout calcul, on convertit en **m/s**.

03 Pourquoi le nucléaire sous l'eau ?

Un moteur diesel brûle du gazole avec l'**oxygène de l'air**. Un sous-marin diesel doit donc remonter près de la surface pour respirer avec un tuba (le **schnorchel**) : il devient repérable. Un réacteur nucléaire, lui, produit sa chaleur par **fission**, sans combustion : il n'a besoin d'**aucun oxygène**. Le sous-marin peut rester en plongée pendant des mois, limité seulement par les vivres et la résistance de l'équipage.

FORMULE

Masse de combustible

$$E = m \times e$$

$$m = \frac{E}{e}$$

E : énergie produite, en joules (J)

m : masse de combustible consommée, en grammes (g) ou en kilogrammes (kg)

e : énergie libérée par unité de masse, en J/g ou en J/kg

Fission de l'uranium 235 : $e = 8,2 \times 10^{10}$ J/g

Combustion du gazole : $e = 42,6$ MJ/kg

EXEMPLE :

1 kg d'uranium 235 contre du gazole

Quelle masse de gazole libère autant d'énergie que la fission complète de **1 kg d'uranium 235** ?

Données :

$$m_U = 1 \text{ kg} = 1\,000 \text{ g}$$

$$e_U = 8,2 \times 10^{10} \text{ J/g}$$

$$e_{\text{gazole}} = 42,6 \text{ MJ/kg} = 42,6 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

a) Énergie libérée par 1 kg d'uranium 235

Relation littérale :

$$E = m_U \times e_U$$

Application numérique :

$$E = 1\,000 \times 8,2 \times 10^{10}$$

Résultat :

$$E = 8,2 \times 10^{13} \text{ J}$$

b) Masse de gazole qui libère la même énergie

Relation littérale :

$$E = m_{\text{gazole}} \times e_{\text{gazole}}$$

$$m_{\text{gazole}} = \frac{E}{e_{\text{gazole}}}$$

Application numérique :

$$m_{\text{gazole}} = \frac{8,2 \times 10^{13}}{42,6 \times 10^6}$$

$$m_{\text{gazole}} \approx 1,92 \times 10^6 \text{ kg}$$

Résultat :

$$m_{\text{gazole}} \approx 1\,920 \text{ t}$$

Interprétation :

1 kg d'uranium 235 remplace près de 2 000 tonnes de gazole, sans consommer d'oxygène.

DÉFI EXPRESS

Défi n° 1 — à toi de jouer !

Calcule l'énergie libérée par la fission de **5 g** d'uranium 235, en joules.

Convertis ensuite cette énergie en kilowattheures.

Rappel : $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$

Correction en classe.

PARTIE II

Produire la chaleur : la chaufferie

La **chaufferie** est la partie du sous-marin qui produit la chaleur. Elle comprend le **réacteur** (la cuve et le cœur), le **circuit primaire**, le **pressuriseur** et le **générateur de vapeur**. Elle est enfermée dans un compartiment blindé, au milieu du sous-marin.

04 La fission : d'où vient la chaleur ?

Le combustible est de l'oxyde d'uranium **enrichi en uranium 235**. Lorsqu'un **neutron** frappe un noyau d'uranium 235, ce noyau se casse en deux **fragments** : c'est la **fission**. Les fragments partent à grande vitesse et chauffent la matière qui les entoure. La fission libère aussi **2 ou 3 neutrons**, qui peuvent casser d'autres noyaux : c'est la **réaction en chaîne**.

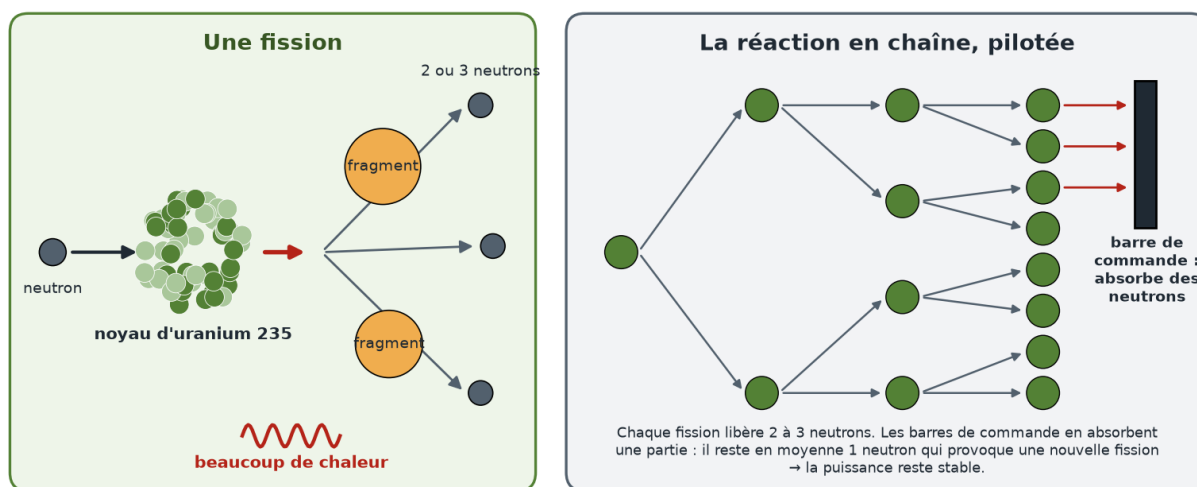


FIG. 2 La fission d'un noyau d'uranium 235 et la réaction en chaîne contrôlée.

LE SAVAIS-TU ?

Un combustible extraordinairement concentré

La fission complète de **1 g d'uranium 235** libère environ **$8,2 \times 10^{10}$ J**, autant que la combustion de près de **2 tonnes de gazole**. C'est ce qui permet au Suffren de naviguer environ **dix ans** sans recharger son cœur.

05 Le cœur : piloter la réaction

Le **cœur** est formé d'assemblages de **crayons combustibles** plongés dans l'eau, à l'intérieur d'une **cuve** en acier. Des **grappes de commande**, faites d'un matériau qui absorbe les neutrons, coulisent entre les crayons.

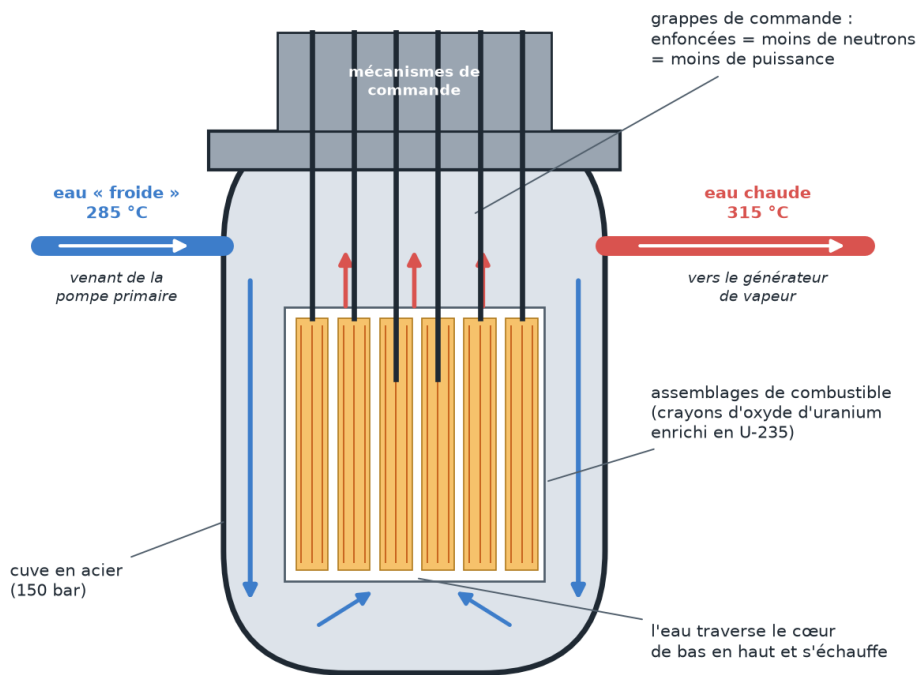


FIG. 3 Coupe simplifiée de la cuve et du cœur du réacteur.

Le pilote règle le nombre de fissions en déplaçant les grappes :

- **grappes enfoncées** : elles absorbent davantage de neutrons, les fissions diminuent, la puissance baisse ;
- **grappes remontées** : davantage de neutrons provoquent des fissions, la puissance augmente ;
- **chute des grappes** : en cas d'anomalie, elles tombent d'un coup dans le cœur et la réaction s'arrête en quelques secondes.

À RETENIR

Le réacteur est une source de chaleur pilotable

Le réacteur ne produit **ni électricité ni mouvement** : il produit de la **chaleur**. Les grappes de commande règlent cette chaleur à la demande, de quelques mégawatts à quai jusqu'à la pleine puissance en transit rapide.

06 Le circuit primaire et le pressuriseur

L'eau qui traverse le cœur forme le **circuit primaire**, une boucle fermée mise en mouvement par les **pompes primaires**. Elle entre dans la cuve vers 285 °C et en ressort vers 315 °C : elle transporte la chaleur du cœur jusqu'au **générateur de vapeur**. Cette eau joue deux rôles :

- **caloporteur** : elle transporte la chaleur du cœur vers le générateur de vapeur ;
- **modérateur** : elle ralentit les neutrons pour qu'ils puissent provoquer de nouvelles fissions.

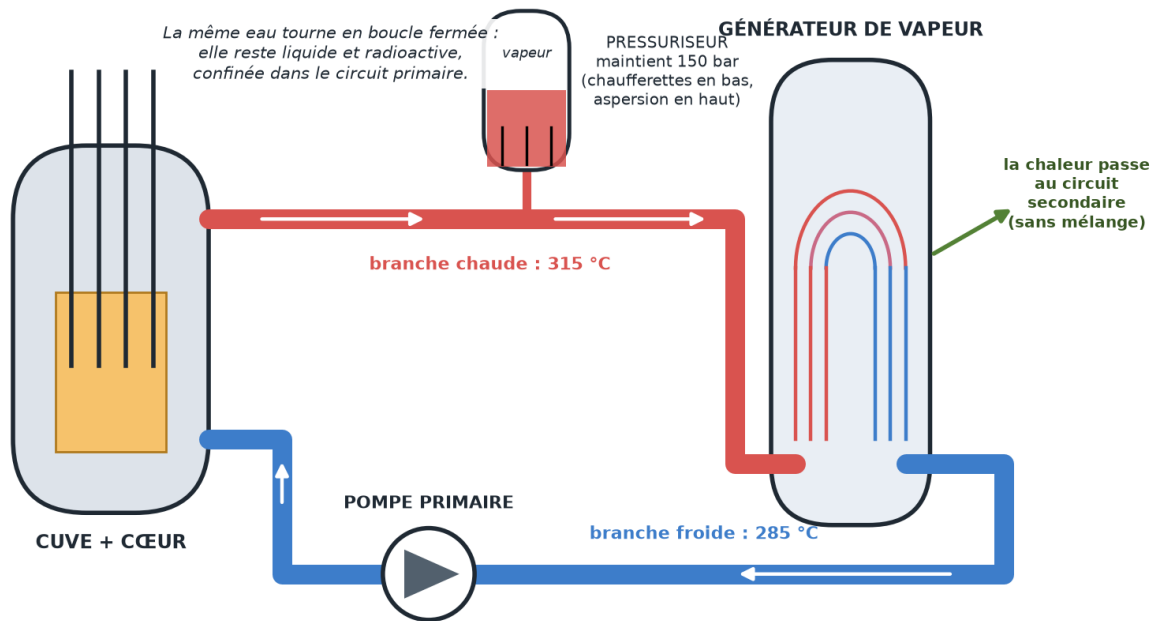


FIG. 4 Le circuit primaire : cuve, pressuriseur, générateur de vapeur, pompe primaire.

Sous la pression atmosphérique, l'eau bout à 100 °C. Pour qu'elle reste **liquide à 315 °C**, le **pressuriseur** la maintient à **150 bar** : à cette pression, l'eau ne bout qu'à 342 °C.

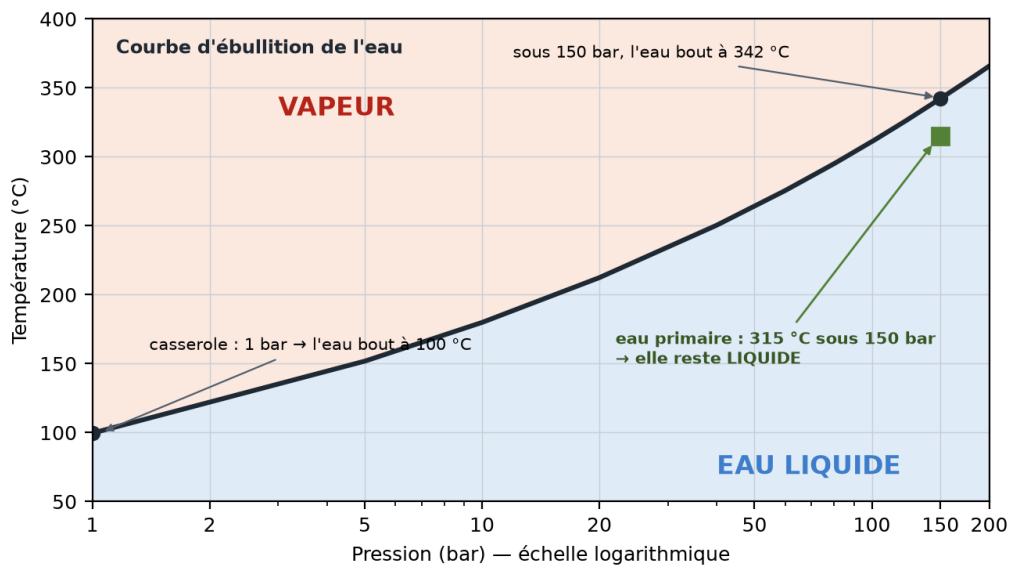


FIG. 5 Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.

IMAGE MENTALE

La cocotte-minute

Dans une cocotte-minute fermée, la pression monte et l'eau bout vers 120 °C au lieu de 100 °C. Le pressuriseur fait la même chose en beaucoup plus fort : sous 150 bar, l'eau peut dépasser 300 °C sans bouillir.

FORMULE

Puissance thermique transportée par un fluide

$$P = q_m \times c \times \Delta T$$

$$q_m = \frac{P}{c \times \Delta T}$$

$$\Delta T = \frac{P}{q_m \times c}$$

P : puissance thermique, en watts (W)

q_m : débit massique du fluide, en kilogrammes par seconde (kg/s)

c : capacité thermique massique, en J·kg⁻¹·°C⁻¹

ΔT : variation de température du fluide, en degrés Celsius (°C)

EXEMPLE :

Le circuit d'eau d'un réacteur de recherche

Un petit réacteur de recherche produit **2 MW** de chaleur. Son eau de refroidissement s'échauffe de **20 °C**. Quel débit d'eau faut-il ?

Données :

$$P = 2 \text{ MW} = 2 \times 10^6 \text{ W}$$

$$\Delta T = 20 \text{ °C}$$

$$c = 4\,180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

Relation littérale :

$$P = q_m \times c \times \Delta T$$

$$q_m = \frac{P}{c \times \Delta T}$$

Application numérique :

$$q_m = \frac{2 \times 10^6}{4\,180 \times 20}$$

$$q_m = \frac{2\,000\,000}{83\,600}$$

Résultat :

$$q_m \approx 23,9 \text{ kg/s}$$

Interprétation :

environ 24 litres d'eau traversent le cœur chaque seconde.

PIÈGE À ÉVITER

Mégawatts et degrés

- Dans la formule de la puissance thermique, la puissance est en **watts**. Exemple :

$$2 \text{ MW} = 2 \times 10^6 \text{ W}$$

- Un écart de température a la même valeur en **°C** et en **kelvins**. Exemple :

$$\Delta T = 20 \text{ °C} = 20 \text{ K}$$

PARTIE III

Convertir : de la chaleur au mouvement

07 Le générateur de vapeur : l'échangeur entre deux circuits

Dans le **générateur de vapeur (GV)**, l'eau primaire circule à l'intérieur de milliers de **tubes en U**. L'eau du **circuit secondaire**, autour des tubes, reçoit la chaleur et se transforme en **vapeur**. Les deux eaux ne se touchent jamais : seule la chaleur traverse la paroi des tubes.

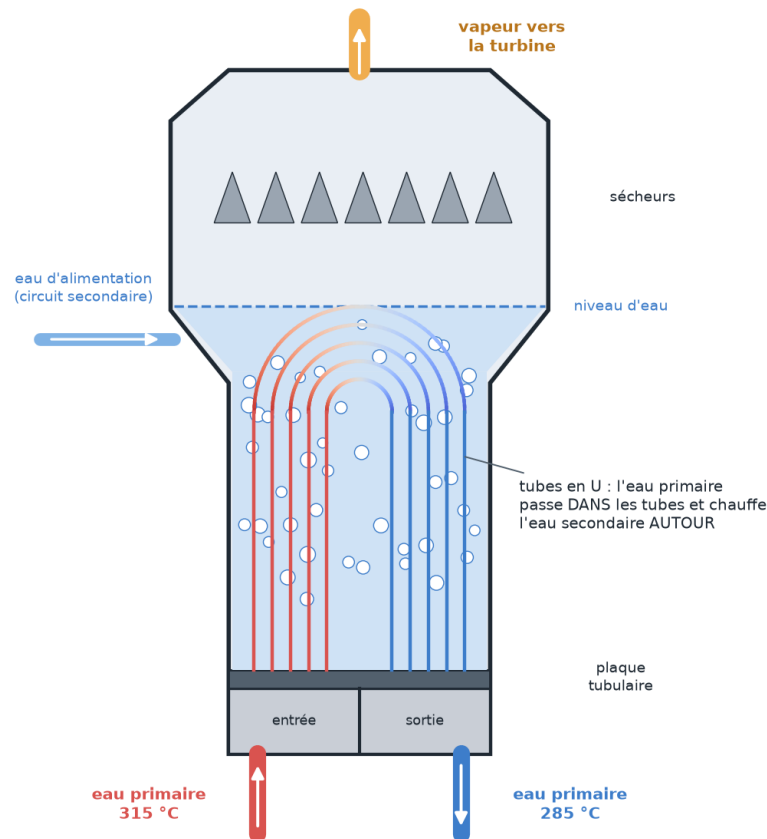


FIG. 6 Principe du générateur de vapeur à tubes en U.

PIÈGE À ÉVITER

Deux circuits, deux eaux différentes

- L'eau du circuit primaire est **radioactive** : elle reste **confinée** dans la chaufferie.
- La vapeur qui fait tourner la turbine vient du **circuit secondaire** : elle n'a jamais traversé le cœur.

08 Le cycle eau-vapeur : turbine, condenseur, pompe

La vapeur produite par le GV se **détend** dans la **turbine** : elle pousse les aubes et fait tourner l'arbre. À la sortie, la vapeur est refroidie dans le **condenseur** par de l'**eau de mer** et redevient liquide. La **pompe d'alimentation** renvoie cette eau vers le GV : le cycle recommence.

Circuit secondaire = boucle fermée : l'eau se vaporise (GV), se détend (turbine), se condense (condenseur) puis est renvoyée vers le GV (pompe).

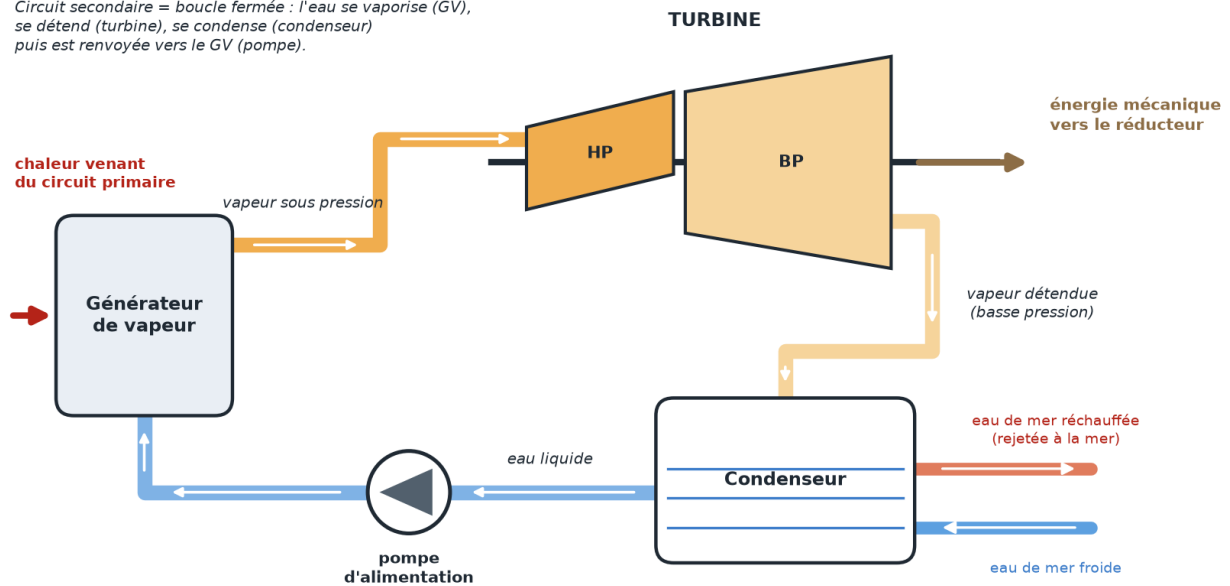


FIG. 7 Le circuit secondaire : générateur de vapeur, turbine, condenseur, pompe d'alimentation.

À RETENIR Toute la chaleur ne devient pas du travail

Une machine thermique a besoin d'une **source chaude** (le GV) et d'une **source froide** (l'eau de mer du condenseur). Une grande partie de la chaleur reçue est obligatoirement rendue à la source froide : c'est la principale « perte » de la chaîne, et la raison pour laquelle le rendement d'une turbine à vapeur reste proche de 30 %.

FORMULE Rendement et pertes

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_u = \eta \times P_a$$

$$\text{pertes} = P_a - P_u$$

η : rendement, sans unité, toujours inférieur à 1

P_u : puissance utile, en watts (W)

P_a : puissance absorbée, en watts (W)

EXEMPLE : La turbine d'un navire de recherche

La turbine d'un navire reçoit **10 MW** de puissance thermique sous forme de vapeur. Son rendement vaut **0,30**.

Données :

$$P_a = 10 \text{ MW}$$

$$\eta = 0,30$$

a) Puissance mécanique sur l'arbre

Relation littérale :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_u = \eta \times P_a$$

Application numérique :

$$P_u = 0,30 \times 10$$

Résultat :

$$P_u = 3 \text{ MW}$$

b) Puissance cédée à l'eau de mer

Relation littérale :

$$\text{pertes} = P_a - P_u$$

Application numérique :

$$\text{pertes} = 10 - 3$$

Résultat :

$$\text{pertes} = 7 \text{ MW}$$

Interprétation :

70 % de la chaleur reçue part dans l'eau de mer du condenseur : c'est la source froide.

09 La turbine : de la vapeur à la rotation

La turbine comporte plusieurs **étages** : la vapeur traverse d'abord l'étage **haute pression (HP)**, puis l'étage **basse pression (BP)**. À chaque étage, des aubes fixes orientent le jet de vapeur sur des aubes mobiles qui font tourner l'arbre, à plusieurs milliers de tours par minute.

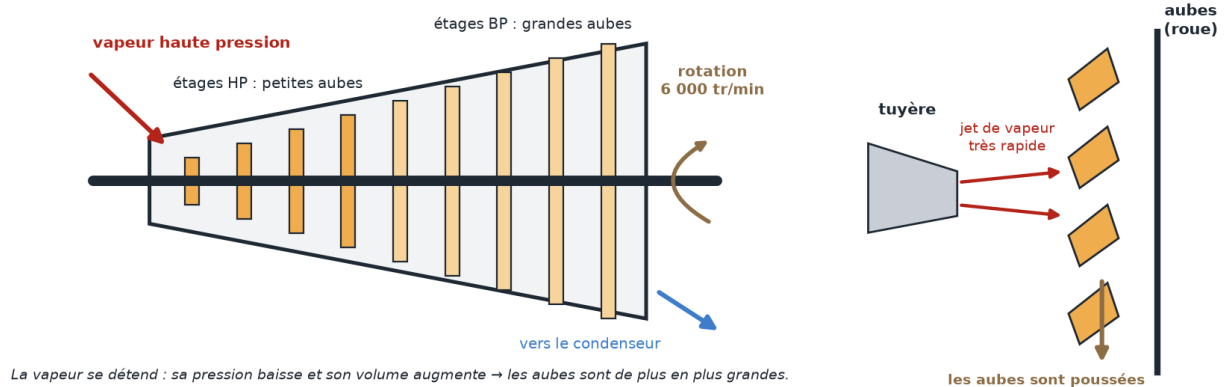


FIG. 8 Principe de la turbine à vapeur : étages HP puis BP, jet de vapeur sur les aubes.

FORMULE

Puissance mécanique en rotation

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

$$P = C \times \omega$$

$$C = \frac{P}{\omega}$$

ω : vitesse angulaire, en radians par seconde (rad/s)

N : fréquence de rotation, en tours par minute (tr/min)

P : puissance mécanique, en watts (W)

C : couple, en newtons-mètres (N·m)

EXEMPLE :

Le couple d'un turbo-alternateur

Une turbine fournit **2 MW** à un alternateur en tournant à **3 000 tr/min**. Quel couple exerce-t-elle ?

Données :

$$P = 2 \text{ MW} = 2 \times 10^6 \text{ W}$$

$$N = 3\,000 \text{ tr/min}$$

a) Vitesse angulaire de l'arbre

Relation littérale :

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

Application numérique :

$$\omega = \frac{2\pi \times 3\,000}{60}$$

Résultat :

$$\omega \approx 314,2 \text{ rad/s}$$

b) Couple exercé par la turbine

Relation littérale :

$$P = C \times \omega$$

$$C = \frac{P}{\omega}$$

Application numérique :

$$C = \frac{2 \times 10^6}{314,2}$$

Résultat :

$$C \approx 6\,366 \text{ N} \cdot \text{m}$$

PARTIE IV

Transmettre : du réducteur à la pompe-hélice

10 Le réducteur de vitesse

La turbine tourne beaucoup trop vite pour l'hélice. Le **réducteur**, un train d'engrenages, **divise la fréquence de rotation** et **multiplie le couple**. La puissance, elle, ne fait que diminuer un peu à cause des frottements.

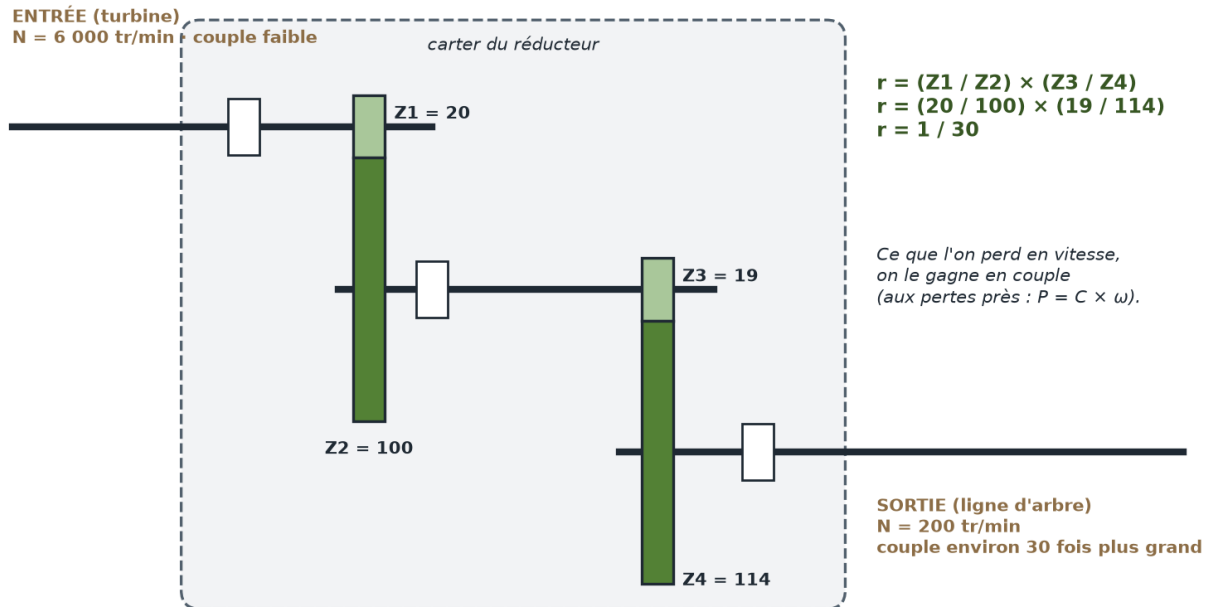


FIG. 9 Schéma d'un réducteur à deux étages d'engrenages.

FORMULE

Rapport de réduction

$$r = \frac{N_{\text{sortie}}}{N_{\text{entrée}}}$$

$$P_s = \eta \times P_e$$

$$C_s = \frac{P_s}{\omega_s}$$

r : rapport de réduction, sans unité (inférieur à 1 pour un réducteur)

N_{sortie} : fréquence de rotation de l'arbre de sortie, en tr/min

N_{entrée} : fréquence de rotation de l'arbre d'entrée, en tr/min

P_e : puissance reçue à l'entrée, en watts (W)

P_s : puissance disponible à la sortie, en watts (W)

η : rendement du réducteur, sans unité

C_s : couple de sortie, en N·m

ω_s : vitesse angulaire de sortie, en rad/s

À la sortie, l'arbre tourne moins vite, mais avec beaucoup plus de couple.

EXEMPLE : Le réducteur d'un treuil de port

Un réducteur reçoit **300 kW** à **1 500 tr/min**. Il entraîne un treuil à **50 tr/min**. Son rendement vaut **0,96**.

Données :

$$P_e = 300 \text{ kW} = 300\,000 \text{ W}$$

$$N_e = 1\,500 \text{ tr/min}$$

$$N_s = 50 \text{ tr/min}$$

$$\eta = 0,96$$

a) Rapport de réduction

Relation littérale :

$$r = \frac{N_s}{N_e}$$

Application numérique :

$$r = \frac{50}{1\,500}$$

Résultat :

$$r = \frac{1}{30} \approx 0,033$$

b) Puissance à la sortie

Relation littérale :

$$P_s = \eta \times P_e$$

Application numérique :

$$P_s = 0,96 \times 300\,000$$

Résultat :

$$P_s = 288\,000 \text{ W}$$

c) Couple à la sortie

Relation littérale :

$$\omega_s = \frac{2\pi \times N_s}{60}$$

$$C_s = \frac{P_s}{\omega_s}$$

Application numérique :

$$\omega_s = \frac{2\pi \times 50}{60}$$

$$\omega_s \approx 5,236 \text{ rad/s}$$

$$C_s = \frac{288\,000}{5,236}$$

Résultat :

$$C_s \approx 55\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Interprétation :

la vitesse est divisée par 30, le couple est multiplié par près de 29 (le rendement prélève un peu).

11 La ligne d'arbre et les brides d'accouplement

La **ligne d'arbre** transmet la rotation du réducteur jusqu'à la pompe-hélice, à travers la coque. Elle est formée de tronçons reliés par des **brides d'accouplement** : deux plateaux boulonnés face contre face. Le couple passe

d'un plateau à l'autre par les **vis** réparties sur un cercle. La **butée** reprend la poussée de l'hélice et la transmet à la coque.

La ligne d'arbre transmet la rotation jusqu'à la pompe-hélice ; la butée transmet la poussée à la coque.

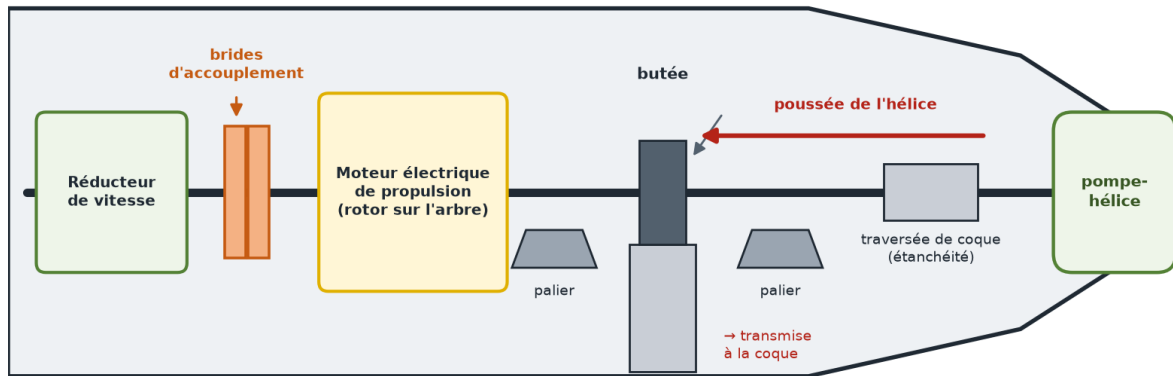


FIG. 10 La ligne d'arbre : réducteur, brides, moteur électrique, paliers, butée, pompe-hélice.

FORMULE

Couple et effort tangentiel

$$C = F \times R$$

$$C = n \times F_{\text{vis}} \times R$$

$$F_{\text{vis}} = \frac{C}{n \times R}$$

C : couple transmis, en newtons-mètres (N·m)

F : effort tangentiel total, en newtons (N)

F_{vis} : effort tangentiel supporté par une vis, en newtons (N)

n : nombre de vis, sans unité

R : rayon du cercle des vis, en mètres (m)

EXEMPLE :

La bride d'un arbre de pompe

Une bride transmet un couple de **12 kN·m** par **6 vis** placées sur un cercle de diamètre **200 mm**. Quel effort supporte chaque vis ?

Données :

$$C = 12 \text{ kN}$$

$$m = 12\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$n = 6$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$R = \frac{D}{2} = 100 \text{ mm} = 0,100 \text{ m}$$

Relation littérale :

$$C = n \times F_{\text{vis}} \times R$$

$$F_{\text{vis}} = \frac{C}{n \times R}$$

Application numérique :

$$F_{\text{vis}} = \frac{12\,000}{6 \times 0,100}$$

$$F_{\text{vis}} = \frac{12\,000}{0,6}$$

Résultat :

$$F_{\text{vis}} = 20\,000 \text{ N} = 20 \text{ kN}$$

Interprétation :

attention : on utilise le rayon, c'est-à-dire la moitié du diamètre, et en mètres.

12 La pompe-hélice

La **pompe-hélice** est une hélice enfermée dans un carénage, avec des aubes fixes qui redressent le jet d'eau. Elle rejette l'eau vers l'arrière ; par réaction, le sous-marin avance. Plus **silencieuse** qu'une hélice classique, elle repousse l'apparition de la **cavitation** (bulles de vapeur qui implosent bruyamment sur les pales).

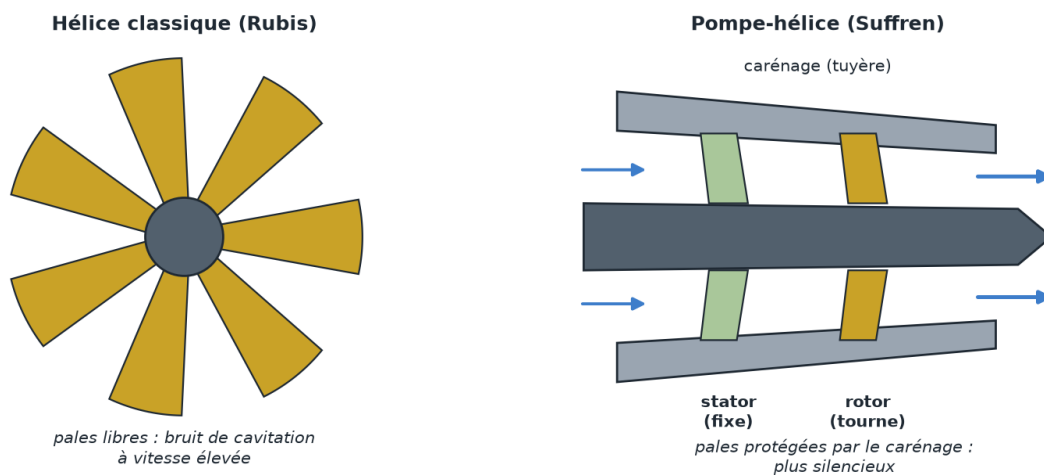


FIG. 11 Hélice classique et pompe-hélice.

FORMULE

Puissance mécanique en translation

$$v_{(m/s)} = \frac{v_{(nœuds)} \times 1\,852}{3\,600}$$

$$P = F \times v$$

$$F = \frac{P}{v}$$

v : vitesse du navire, en mètres par seconde (m/s)

P : puissance de poussée, en watts (W)

F : poussée, en newtons (N)

Seule une partie de la puissance reçue par l'hélice devient de la poussée : c'est le rendement propulsif.

EXEMPLE :

Le ferry de Corse

Un ferry navigue à **20 nœuds**. Ses hélices développent une puissance de poussée de **5 MW**. Quelle est la poussée ?

Données :

$$v = 20 \text{ nœuds}$$

$$P = 5 \text{ MW} = 5 \times 10^6 \text{ W}$$

a) Vitesse en mètres par seconde

Relation littérale :

$$v_{(m/s)} = \frac{v_{(nœuds)} \times 1\,852}{3\,600}$$

Application numérique :

$$v = \frac{20 \times 1\,852}{3\,600}$$

Résultat :

$$v \approx 10,29 \text{ m/s}$$

b) Poussée des hélices

Relation littérale :

$$P = F \times v$$

$$F = \frac{P}{v}$$

Application numérique :

$$F = \frac{5 \times 10^6}{10,29}$$

Résultat :

$$F \approx 486\,000 \text{ N} \approx 486 \text{ kN}$$

DÉFI EXPRESS

Défi n° 2 — à toi de jouer !

Un remorqueur pousse avec une force de **150 kN** à **6 nœuds**.

Calcule sa puissance de poussée en kW.

Correction en classe.

PARTIE V

Trois modes de propulsion et le bilan

13 Trois chemins pour l'énergie

La propulsion du Suffren est **hybride**. Selon la mission, l'équipage choisit le chemin suivi par l'énergie :

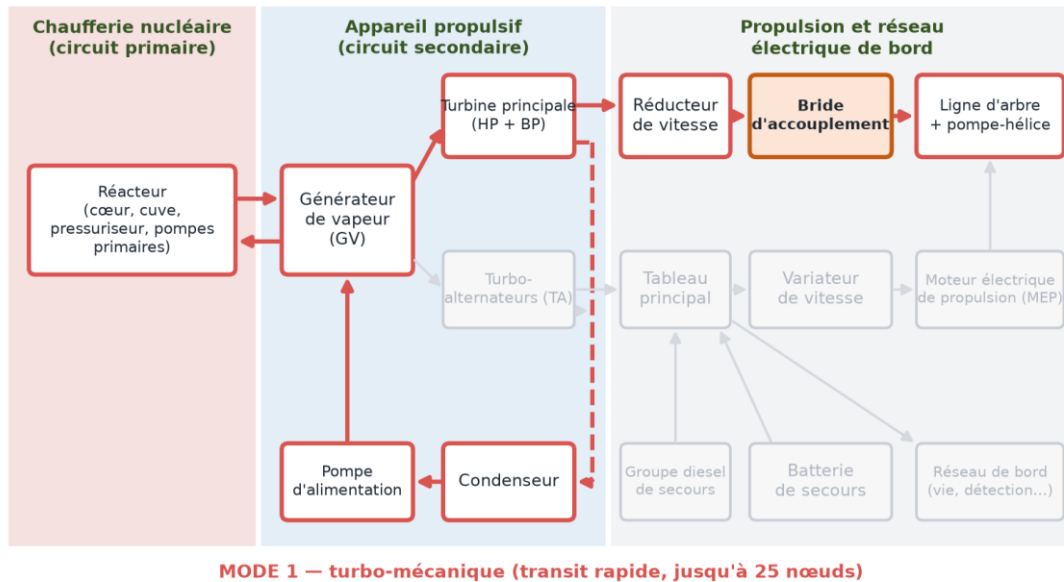


FIG. 12 Mode 1 — turbo-mécanique : la turbine entraîne la ligne d'arbre par le réducteur.

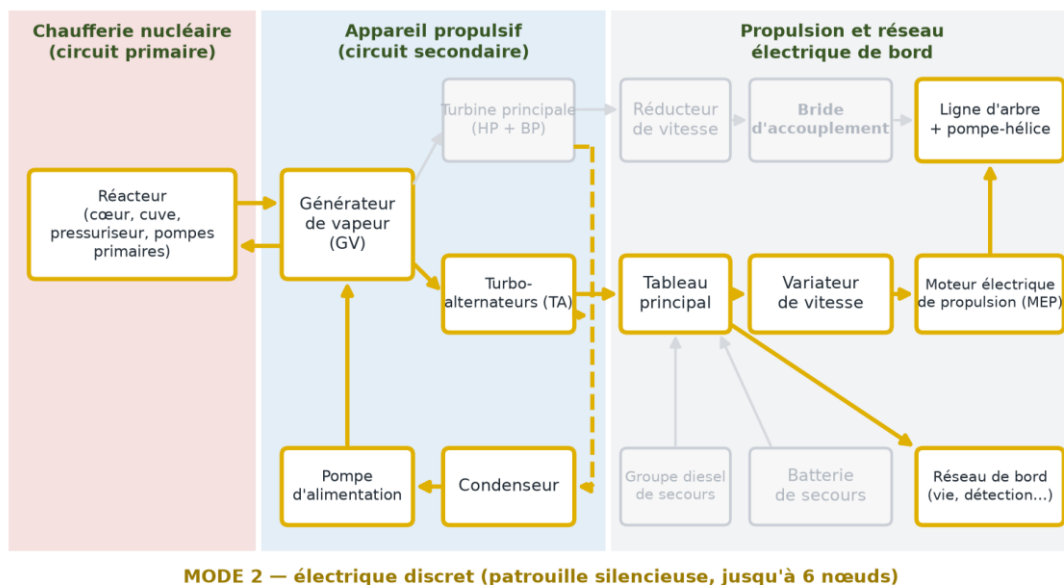


FIG. 13 Mode 2 — électrique discret : les turbo-alternateurs alimentent le moteur électrique.

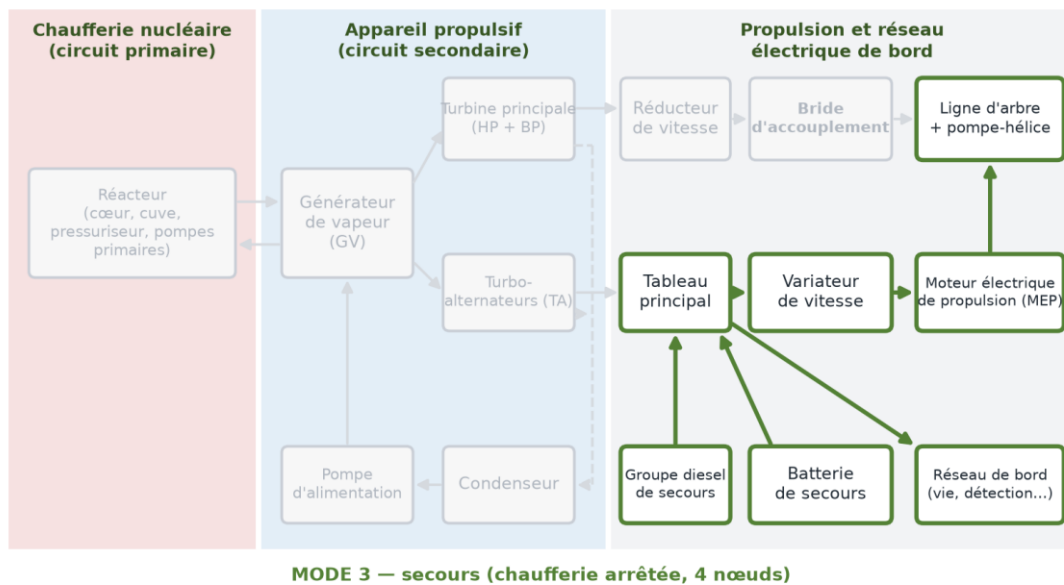


FIG. 14 Mode 3 — secours : la batterie ou le diesel alimente le moteur électrique.

Chaque constituant remplit une **fonction** de la chaîne d'énergie : **alimenter**, **distribuer**, **convertir** ou **transmettre**. Exemple : la recharge de la batterie par le groupe diesel de secours, au schnorchel.



14 Puissance et vitesse : la loi du cube

Plus le sous-marin va vite, plus l'eau résiste. La puissance nécessaire varie comme le **cube** de la vitesse : aller deux fois moins vite demande **huit fois moins** de puissance. C'est tout l'intérêt du mode électrique discret.

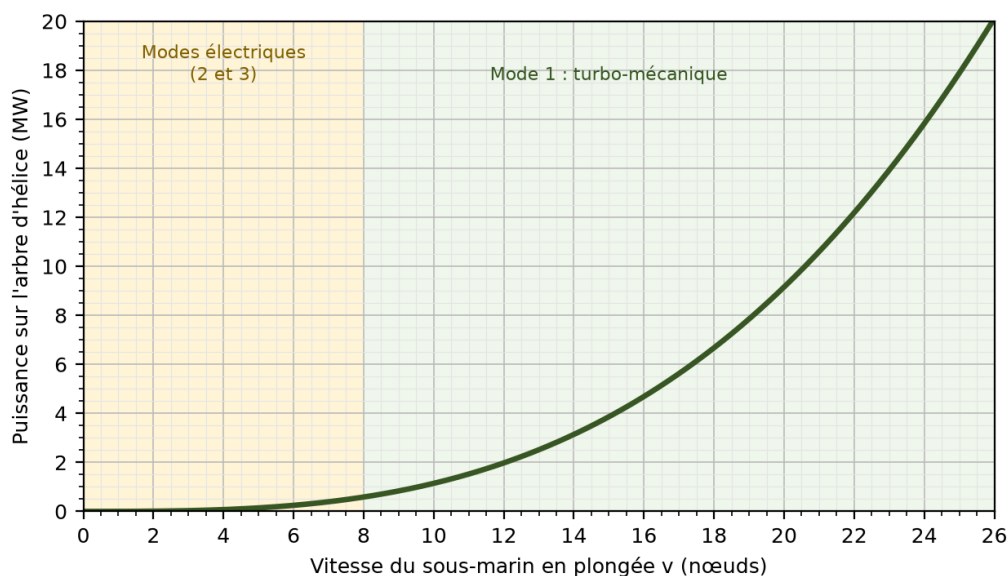


FIG. 15 Puissance sur l'arbre d'hélice en fonction de la vitesse (données pédagogiques).

FORMULE

Loi de puissance propulsive

$$P(v) = P_{\max} \times \left(\frac{v}{v_{\max}}\right)^3$$

$P(v)$: puissance nécessaire à la vitesse v , dans la même unité que $P_{\max}$

$P_{\max}$: puissance nécessaire à la vitesse maximale

v : vitesse étudiée

$v_{\max}$: vitesse maximale, dans la même unité que v

EXEMPLE :

Un navire qui ralentit

Un navire a besoin de **8 MW** sur son arbre pour naviguer à **20 nœuds**. Quelle puissance lui faut-il à **10 nœuds** ?

Données :

$$P_{\max} = 8 \text{ MW}$$

$$v_{\max} = 20 \text{ nœuds}$$

$$v = 10 \text{ nœuds}$$

Relation littérale :

$$P(v) = P_{\max} \times \left(\frac{v}{v_{\max}}\right)^3$$

Application numérique :

$$P = 8 \times \left(\frac{10}{20}\right)^3$$

$$P = 8 \times 0,5^3$$

$$P = 8 \times 0,125$$

Résultat :

$$P = 1 \text{ MW}$$

Interprétation :

deux fois moins vite, c'est $2 \times 2 \times 2 = 8$ fois moins de puissance.

15 L'électricité à bord : triphasé et batterie

Les **turbo-alternateurs** produisent l'électricité de bord en **triphasé**. En mode 2 et en mode 3, un **variateur** règle la tension et la fréquence envoyées au **moteur électrique de propulsion (MEP)**. En secours, l'énergie vient d'une **batterie**, rechargée par le groupe diesel.

FORMULE

Puissance électrique en triphasé

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi}$$

P : puissance active, en watts (W)

U : tension entre deux phases, en volts (V)

I : intensité dans chaque fil de ligne, en ampères (A)

$\cos \varphi$: facteur de puissance, sans unité

FORMULE

Énergie d'une batterie et autonomie

$$E = U \times Q$$

$$t = \frac{E}{P}$$

E : énergie stockée, en wattheures (W·h)

U : tension de la batterie, en volts (V)

Q : capacité de la batterie, en ampères-heures (A·h)

P : puissance demandée à la batterie, en watts (W)

t : autonomie, en heures (h)

EXEMPLE :

Le moteur d'un drone sous-marin

Un moteur triphasé absorbe **50 kW** sous **400 V**, avec un facteur de puissance de **0,85**. Quelle intensité circule dans chaque fil ?

Données :

$$P = 50 \text{ kW} = 50\,000 \text{ W}$$

$$U = 400 \text{ V}$$

$$\cos \varphi = 0,85$$

Relation littérale :

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi}$$

Application numérique :

$$I = \frac{50\,000}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,85}$$

$$I = \frac{50\,000}{588,9}$$

Résultat :

$$I \approx 84,9 \text{ A}$$

EXEMPLE :

La batterie du drone sous-marin

La batterie du drone indique **48 V** et **200 A·h**. Elle alimente un équipement de **2 kW**. Quelle est l'autonomie ?

Données :

$$U = 48 \text{ V}$$

$$Q = 200 \text{ A} \cdot \text{h}$$

$$P = 2 \text{ kW} = 2\,000 \text{ W}$$

a) Énergie stockée

Relation littérale :

$$E = U \times Q$$

Application numérique :

$$E = 48 \times 200$$

Résultat :

$$E = 9\,600 \text{ W} \cdot \text{h}$$

b) Autonomie

Relation littérale :

$$t = \frac{E}{P}$$

Application numérique :

$$t = 9\,600 \div 200$$

Résultat :

$$t = 48 \text{ h}$$

Interprétation :

0,8 h $\times$ 60 = 48 min : l'autonomie est de 4 h 48 min.

16 Le rendement global et le diagramme de Sankey

Quand l'énergie traverse plusieurs convertisseurs, chacun prélève sa part de pertes. Le rendement de la chaîne complète est le **produit** des rendements. Un **diagramme de Sankey** représente ces flux par des flèches dont la largeur est proportionnelle à la puissance : on voit d'un coup d'œil où partent les pertes.

FORMULE

Rendement global

$$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$$

$$\eta_g = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}}$$

η_g : rendement global de la chaîne, sans unité

η_1 : rendement du premier constituant traversé, sans unité

η_2 : rendement du deuxième constituant traversé, sans unité

η_3 : rendement du troisième constituant traversé, sans unité

P_{sortie} : puissance utile à la sortie de la chaîne, en watts (W)

$P_{\text{entrée}}$: puissance absorbée à l'entrée de la chaîne, en watts (W)

Le rendement global est toujours plus petit que le plus petit des rendements de la chaîne.

MÉTHODE

Construire un diagramme de Sankey

1. À gauche, dessiner la flèche d'entrée : la puissance absorbée par le premier constituant.

2. Pour chaque constituant, calculer la puissance utile :

$$P_u = \eta \times P_a$$

puis les pertes :

$$\text{pertes} = P_a - P_u$$

3. Faire partir les pertes vers le bas, avec une largeur proportionnelle à leur valeur.

4. À droite, la flèche restante est la puissance utile finale.

5. Vérifier que l'entrée est égale à la sortie plus la somme des pertes :

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}} + \text{pertes}$$

EXEMPLE :

Bilan de puissance d'une chaîne électrique

Un groupe électrogène fournit **2,0 MW** électriques. L'énergie traverse un variateur, puis un moteur.

Données :

$$P_a = 2,0 \text{ MW}$$

$$\eta_1 = 0,97 \text{ (variateur)}$$

$$\eta_2 = 0,94 \text{ (moteur)}$$

a) Rendement global

Relation littérale :

$$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2$$

Application numérique :

$$\eta_g = 0,97 \times 0,94$$

Résultat :

$$\eta_g \approx 0,912$$

b) Puissance mécanique à la sortie du moteur

Relation littérale :

$$P_u = \eta_g \times P_a$$

Application numérique :

$$P_u = 0,912 \times 2,0$$

Résultat :

$$P_u \approx 1,82 \text{ MW}$$

c) Pertes de la chaîne

Relation littérale :

$$\text{pertes} = P_a - P_u$$

Application numérique :

$$\text{pertes} = 2,0 - 1,82$$

Résultat :

$$\text{pertes} \approx 0,18 \text{ MW}$$

Interprétation :

on vérifie : $1,82 + 0,18 = 2,0 \text{ MW}$, l'énergie se conserve.

DÉFI EXPRESS

Défi n° 3 — à toi de jouer !

Une chaîne comporte trois constituants.

- Rendement du premier constituant : 0,98
- Rendement du deuxième constituant : 0,35
- Rendement du troisième constituant : 0,95

Calcule le rendement global, puis la puissance utile si l'entrée vaut 40 MW.

Correction en classe.

PARTIE VI

Je m'entraîne

17 Le formulaire du chapitre

NOTION	FORMULE	UNITÉS
<i>Masse de combustible</i>	$m = \frac{E}{e}$	m en g ou en kg E en J e en J/g ou en J/kg
<i>Puissance thermique d'un fluide</i>	$P = q_m \times c \times \Delta T$	P en W q_m en kg/s c en J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹ ΔT en °C
<i>Rendement</i>	$\eta = \frac{P_u}{P_a}$	η sans unité P_u en W P_a en W
<i>Pertes</i>	pertes = $P_a - P_u$	pertes en W
<i>Rendement global</i>	$\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$	η_g sans unité
<i>Vitesse angulaire</i>	$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$	ω en rad/s N en tr/min
<i>Puissance en rotation</i>	$P = C \times \omega$	P en W C en N·m ω en rad/s
<i>Rapport de réduction</i>	$r = \frac{N_{\text{sortie}}}{N_{\text{entrée}}}$	r sans unité N en tr/min
<i>Effort sur une vis</i>	$F_{\text{vis}} = \frac{C}{n \times R}$	F_{vis} en N C en N·m R en m
<i>Puissance en translation</i>	$P = F \times v$	P en W F en N v en m/s
<i>Conversion de vitesse</i>	$v_{(m/s)} = \frac{v_{(\text{nœuds})} \times 1\,852}{3\,600}$	1 nœud = 1 852 m/h
<i>Loi du cube</i>	$P(v) = P_{\text{max}} \times \left(\frac{v}{v_{\text{max}}}\right)^3$	P(v) dans l'unité de P _{max} v dans l'unité de v _{max}
<i>Puissance en triphasé</i>	$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$	P en W U en V I en A cos φ sans unité
<i>Énergie d'une batterie</i>	$E = U \times Q$	E en W·h U en V Q en A·h
<i>Énergie et durée</i>	$E = P \times t$	E en J si P en W et t en s E en W·h si P en W et t en h

MÉTHODE Rédiger un calcul (attendu au bac)

1. Données : je recopie chaque donnée sur une ligne, convertie dans l'unité du calcul.

2. Relation littérale : j'écris la formule avec des lettres, avant tout nombre. Exemple :

$$C = \frac{P}{\omega}$$

3. Application numérique : je remplace chaque lettre par sa valeur, une étape par ligne.

4. Résultat : j'écris la valeur avec son unité et un nombre raisonnable de chiffres significatifs.

5. Conclusion : je réponds à la question par une phrase.

18 Quiz : vrai ou faux ?**QUIZ** Coche la bonne case, puis vérifie en classe

AFFIRMATION	VRAI	FAUX
1. Un SNA porte des missiles à tête nucléaire.	☐	☐
2. Le réacteur du Suffren produit directement de l'électricité.	☐	☐
3. L'eau du circuit primaire ne bout pas grâce au pressuriseur.	☐	☐
4. La vapeur qui entraîne la turbine a traversé le cœur.	☐	☐
5. Un réducteur diminue la fréquence de rotation et augmente le couple.	☐	☐
6. Aller deux fois moins vite divise la puissance nécessaire par deux.	☐	☐
7. 10 nœuds valent environ 5,1 m/s.	☐	☐
8. Le rendement global d'une chaîne est la somme des rendements.	☐	☐

19 Exercice d'entraînement : le navire océanographique**EXERCICE D'ENTRAÎNEMENT** Un navire à propulsion électrique

Un navire océanographique est propulsé par un moteur électrique. Ses groupes électrogènes fournissent **3,0 MW** à pleine vitesse (**14 nœuds**). L'hélice tourne alors à **150 tr/min**.

Données

- Rendement du variateur : $\eta_V = 0,97$
- Rendement du moteur : $\eta_M = 0,95$
- Rendement de la ligne d'arbre : $\eta_L = 0,99$
- Rendement propulsif de l'hélice : $\eta_H = 0,65$
- Tension d'alimentation du moteur (triphase) : $U = 690 \text{ V}$
- Facteur de puissance du moteur : $\cos \varphi = 0,90$

Questions

- Q1. Calculer la puissance sur l'arbre d'hélice et le rendement global de la chaîne.
- Q2. Calculer le couple sur l'arbre d'hélice.

- Q3. Convertir 14 nœuds en m/s, puis calculer la poussée de l'hélice.
- Q4. Calculer l'intensité absorbée par le moteur.
- Q5. Avec la loi du cube, calculer la puissance nécessaire sur l'arbre à 7 nœuds.

SYNTHÈSE

Les 5 réflexes du chapitre

- **Je convertis d'abord** les mégawatts en watts, les tr/min en rad/s, les nœuds en m/s et les années en secondes.
- **Je suis l'énergie** bloc par bloc : nucléaire → thermique → mécanique (ou électrique) → mécanique.
- **Je multiplie les rendements** ; un rendement est toujours inférieur à 1 et les pertes sont positives.
- **Je rédige en 3 étapes** : relation littérale, application numérique, résultat avec unité.
- **Je vérifie l'ordre de grandeur** : quelques dizaines de MW pour la chaufferie, quelques centaines de kW en mode discret.