

C.P.G.E
CLASSES PRÉPARATOIRES
AUX GRANDES ÉCOLES

**TRAVAUX D'INITIATIVE
PERSONNELLE ENCADRÉS
T.I.P.E. 2026**

Thème : Cycles, boucles

AQUANOVA

Dessalement de l'eau
de mer

code cnc : OJ080T

Encadré par:

Mr. Essadki Mostafa

Mr. Abderrahim Jadid

**Réalisé par : EL BAROUDI
SALAH-EDDINE**





Plan :

2

➤ **Introduction :**

➤ **Objectifs :**

1. Analyser les procédés existants :

- Comparer les méthodes , thermiques (distillation multi-effet, flash) et membranaires (osmose inverse)-et Choix du moteur: (Moto-pompe).

2. Évaluer l'efficacité énergétique :

- Mesurer la consommation d'énergie et envisager un couplage avec des sources renouvelables.

3. Étudier la qualité de l'eau produite :

- a. Vérifier la réduction de salinité et la conformité aux normes de potabilité.
- b. Réalisation d'une expérience sur un capteur en vue d'explorer ses fonctionnalités

➤ **Conclusion :**

I. Introduction :

Dessalement ?

Le dessalement de l'eau de mer est une solution essentielle à la pénurie d'eau douce. Il permet de rendre l'eau salée potable ou utilisable grâce à des procédés comme l'osmose inverse et la distillation thermique.



Statistiques de l'eau en Afrique :



Disponibilité de l'eau :

- L'Afrique ne possède que 9 % des ressources mondiales d'eau douce.
- D'ici 2030, jusqu'à 700 millions d'Africains pourraient être déplacés à cause du manque d'eau.

Statistiques de l'eau en Afrique :

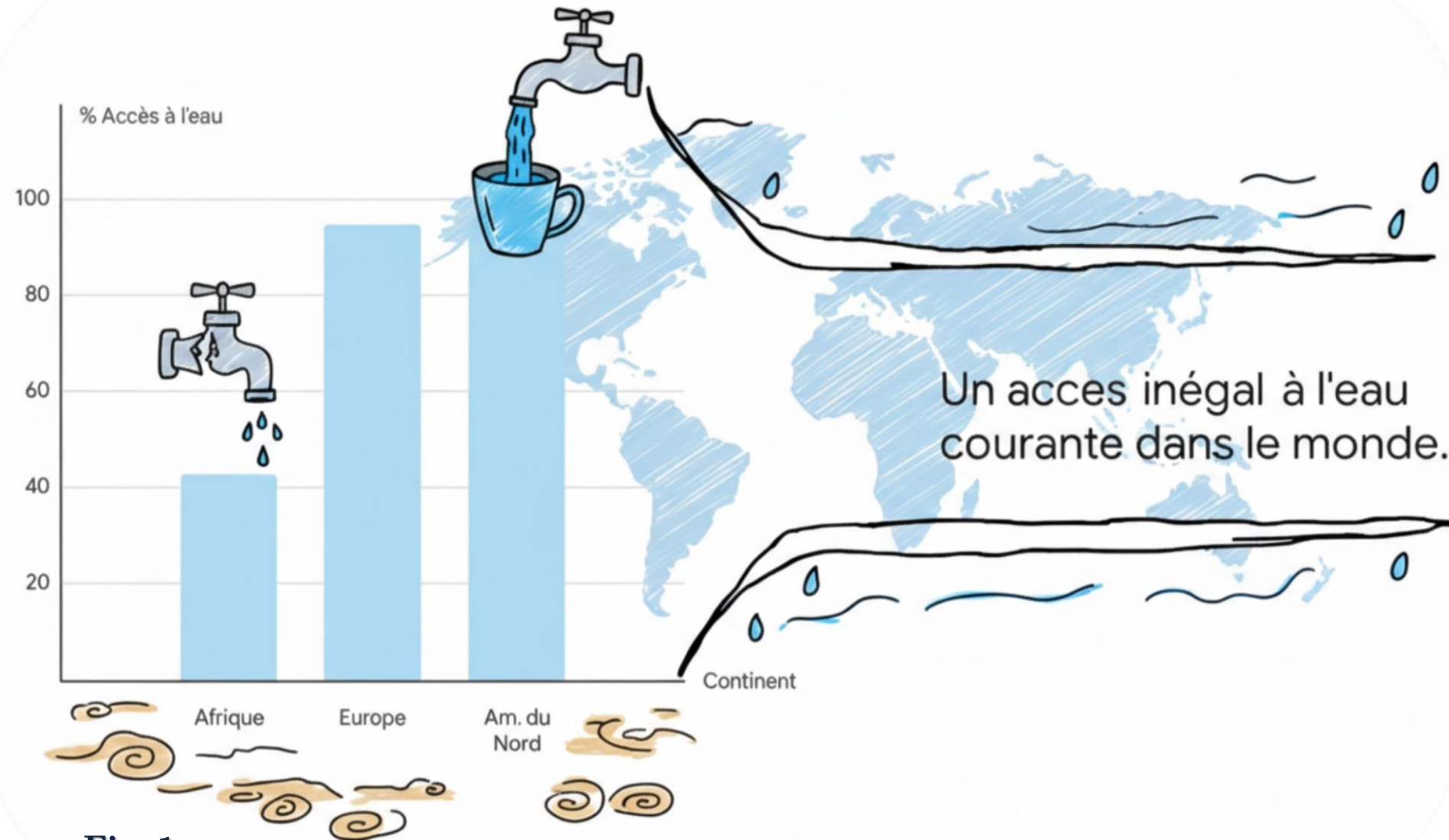


Fig: 1

I. Introduction :

Principales stations de dessalement au Maroc :

➤ Le Maroc compte déjà une douzaine de stations de dessalement en activité, installées le long des côtes atlantiques et méditerranéennes. Parmi elles, certaines se distinguent particulièrement, comme celles d'Agadir, Laâyoune, Dakhla .

Ville / Région	Capacité estimée	Usage principal
Agadir	~275 000 m³/jour	La plus grande station du pays, inaugurée en 2022.
Laâyoune	~26 000 m³/jour	Renforce l'approvisionnement en eau dans le Sahara.
Dakhla	~17 000 m³/jour	Projet stratégique pour développer l'agriculture locale.



Station de dessalement de Laâyoune

► Problématique :

Comment produire de l'eau douce à partir de l'eau de mer de manière efficace, durable et accessible, tout en minimisant la consommation énergétique et l'impact environnemental des procédés de dessalement ?

II. objectifs : Analyser les procédés existants

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

- **Osmose inverse** : on filtre l'eau salée sous pression à travers une membrane qui retient les sels, pour obtenir de l'eau douce.
- **Distillation thermique** : on chauffe l'eau salée pour la faire évaporer, puis on condense la vapeur afin de récupérer de l'eau pure.

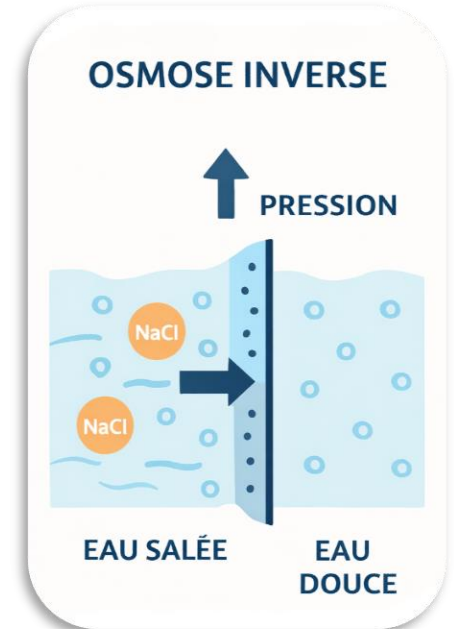


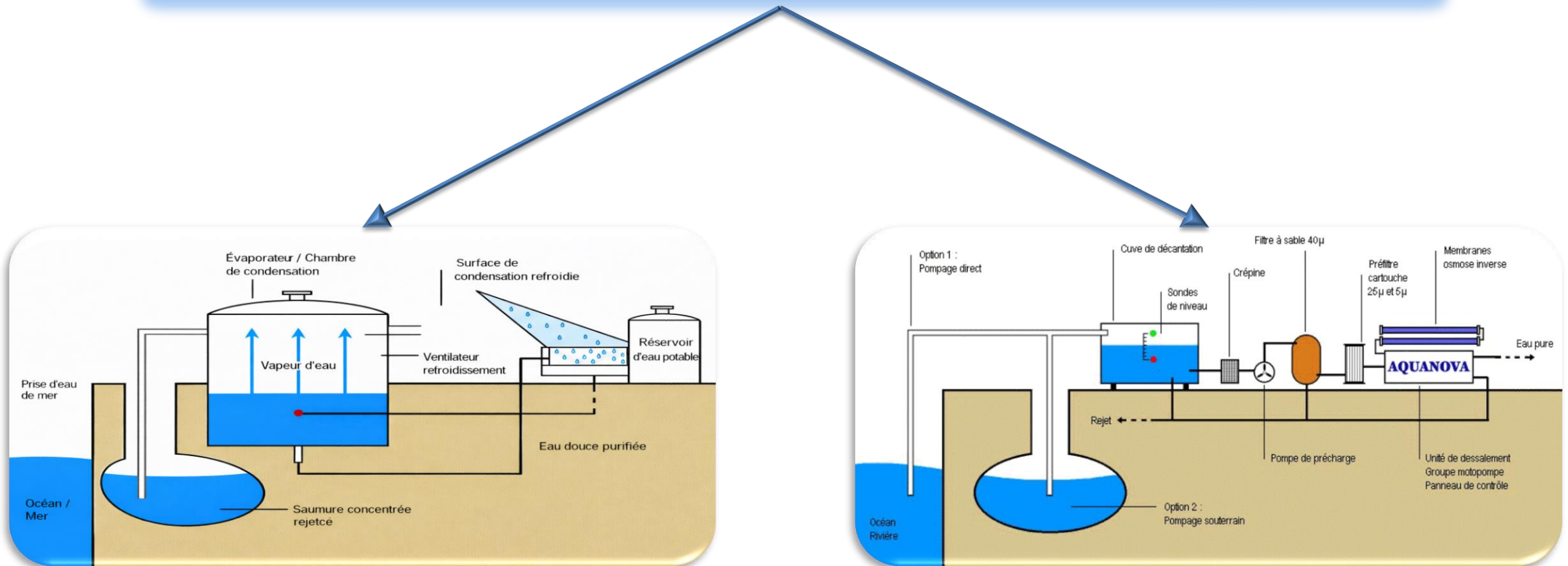
Fig: 2



Fig: 3

II. objectifs : Analyser les procédés existants

Les différentes solutions pour dessaler l'eau de mer :



Quelle solution choisie ?

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

□ Osmose inverse : Principe

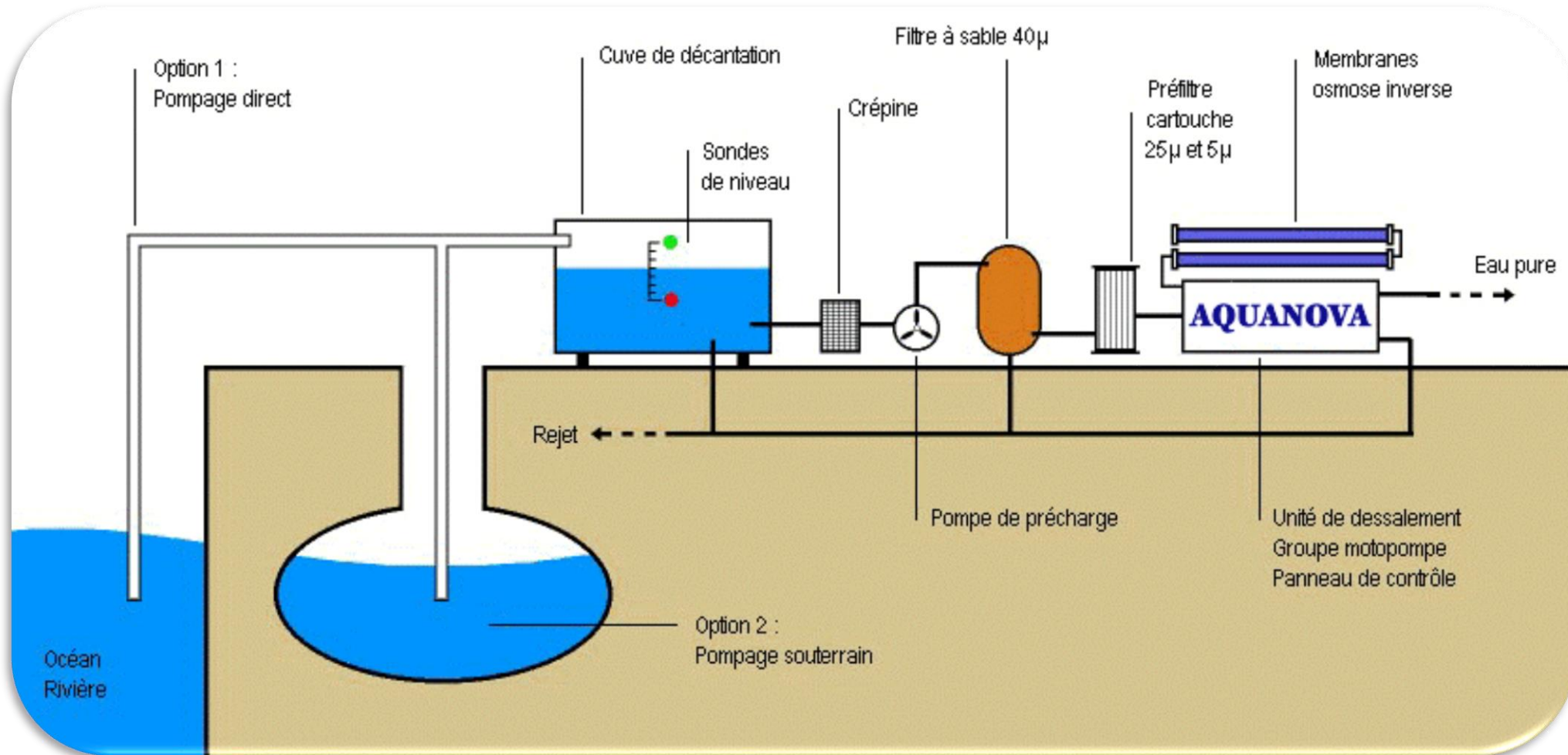


Fig: 4

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

□ Distillation thermique : Principe

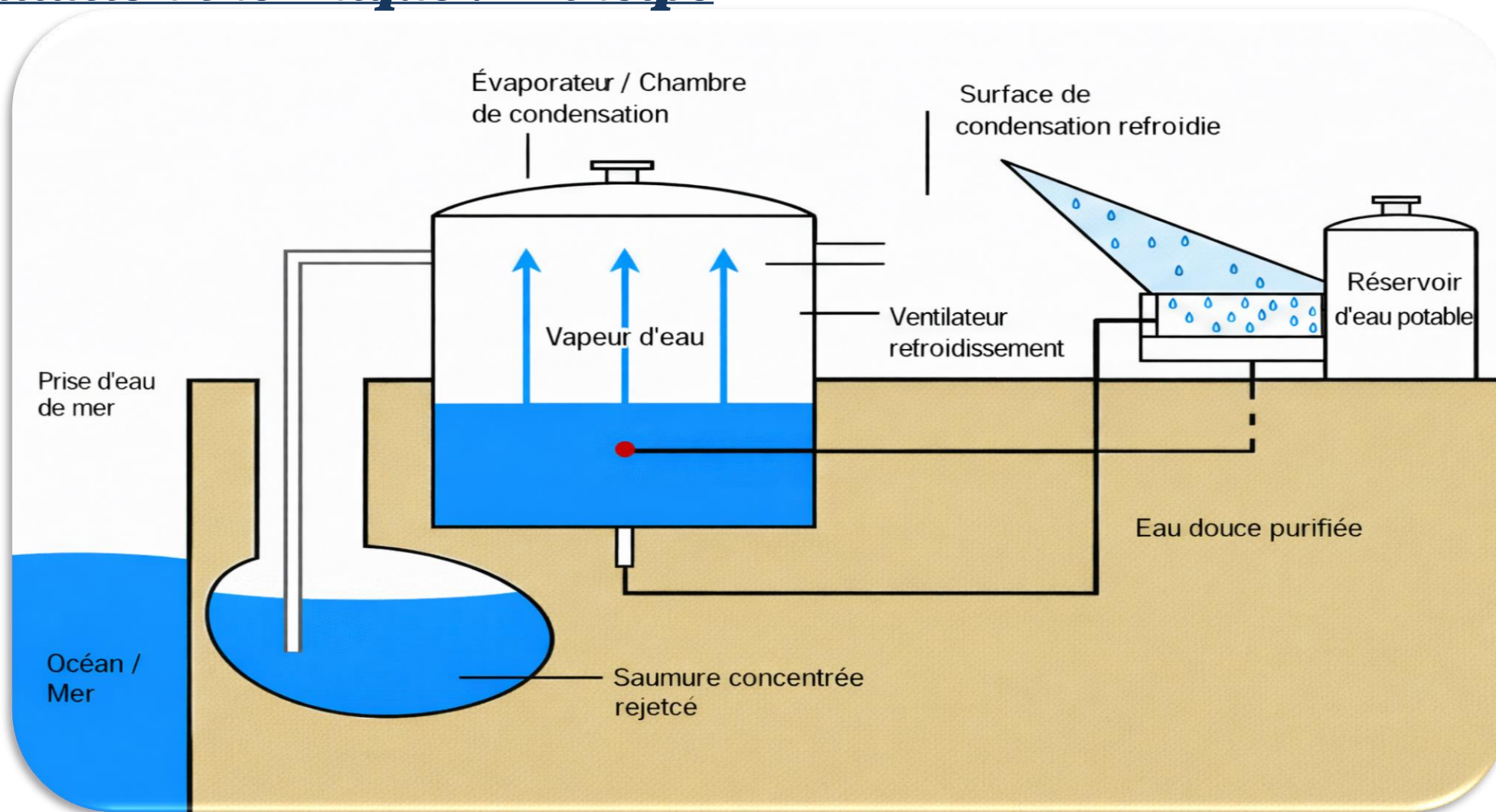


Fig: 5

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

❑ Comparaison entre les deux méthodes :

Comparaison de la consommation énergétique
(kWh par mètre cube)

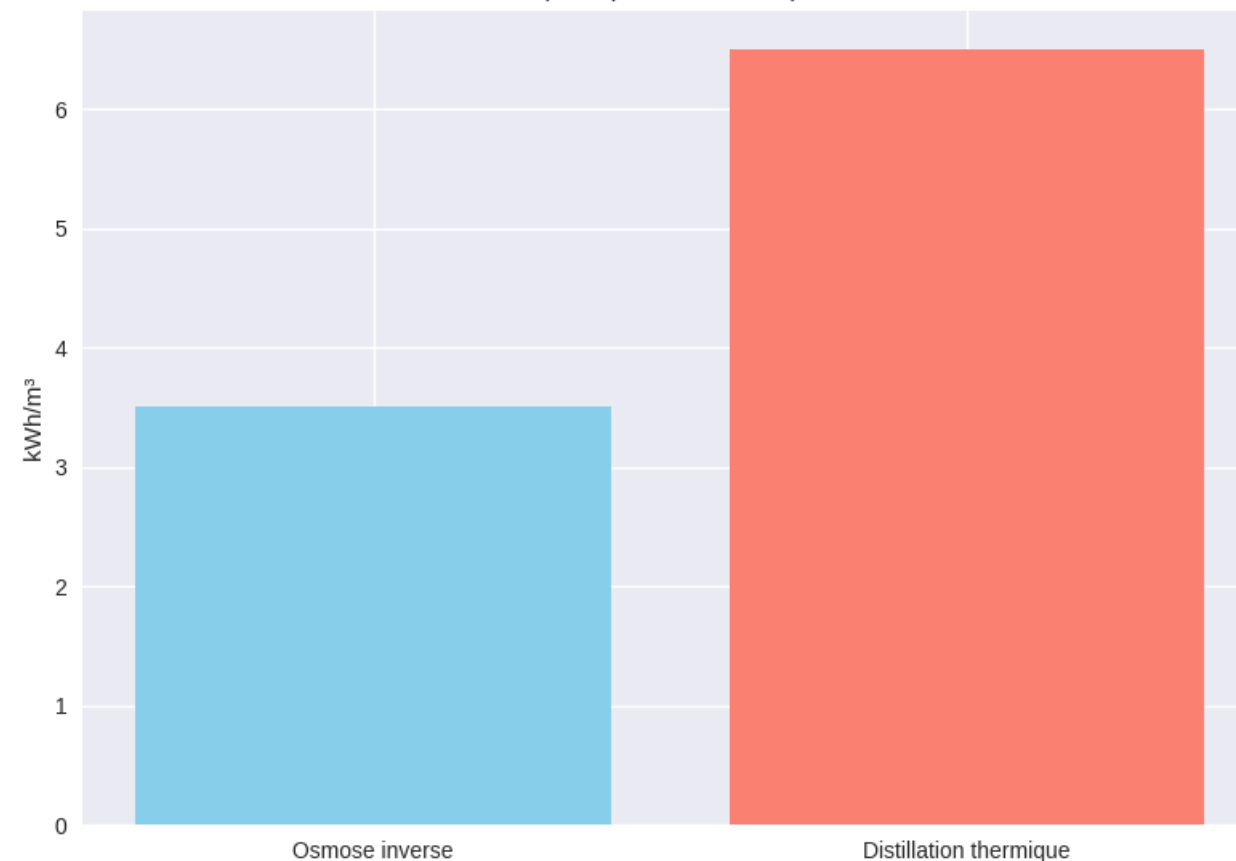


Fig: 6

Comparaison du coût de production
(dollars par mètre cube)

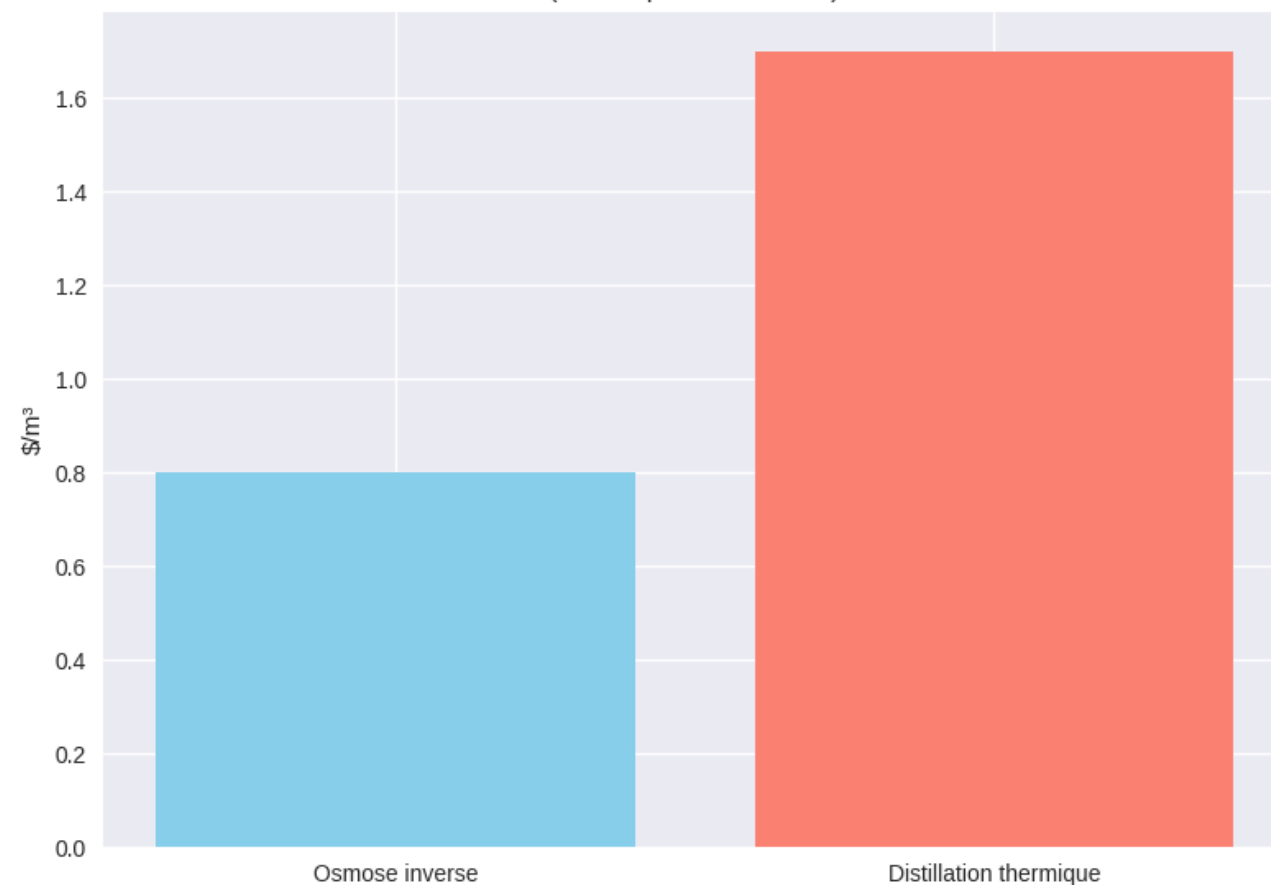


Fig: 7

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

❑ Comparaison entre les deux méthodes :

Critère	Distillation thermique	Osmose inverse
<i>Consommation énergétique</i>	6 à 7 kWh/m ³	3 à 4 kWh/m ³
<i>Coût de production</i>	0,9 à 2,5 \$/m ³	0,5 à 1,1 \$/m ³
<i>Part de marché (2010)</i>	~30 %	~70 %
<i>Installation</i>	Grandes centrales, lourdes et coûteuses	Installations compactes, modulaires et flexibles

Source : <https://tpeorbleu.wordpress.com/techniques-de-dessalement-2/comparatif-des-techniques/>

1. Les deux principales méthodes de dessalement :

□ Résultat final :



En conclusion, après avoir comparé les différentes méthodes de dessalement, j'ai choisi l'**osmose inverse** comme méthode optimale en raison de sa consommation énergétique plus faible et de son coût de production plus avantageux.



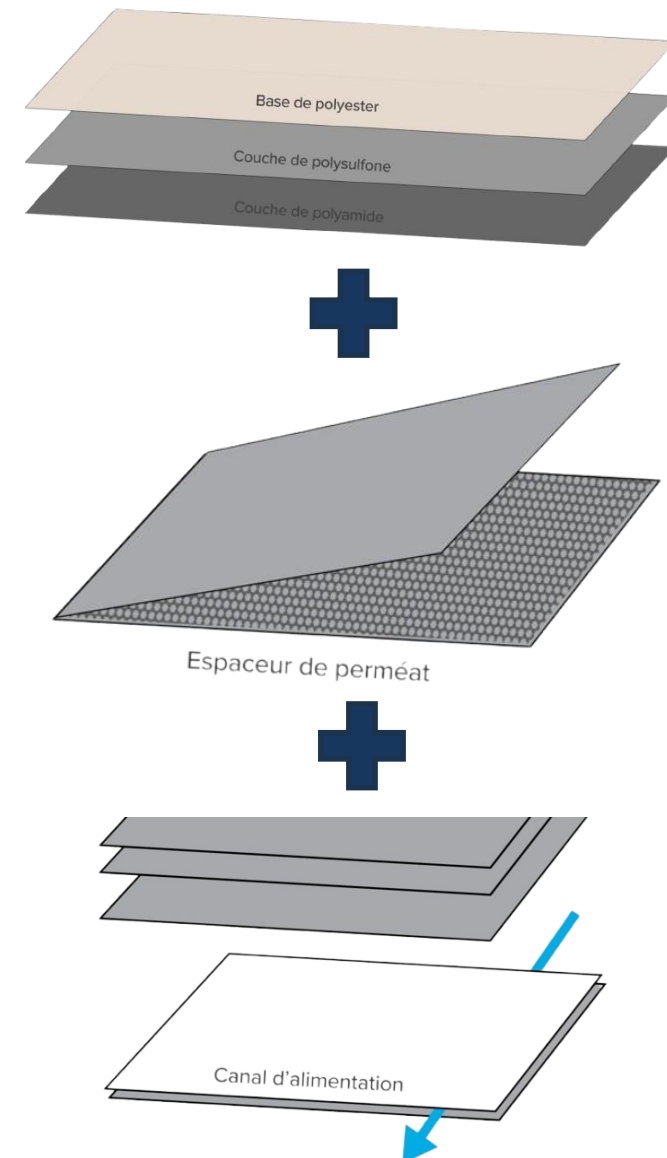
2. Description du système choisie :

❑ **De quoi se compose le filtre d'osmose inverse ? :**



Cartouche membrane osmose inverse

Fig: 8



2. Description du système choisie :

❑ De quoi se compose le filtre d'osmose inverse ? :

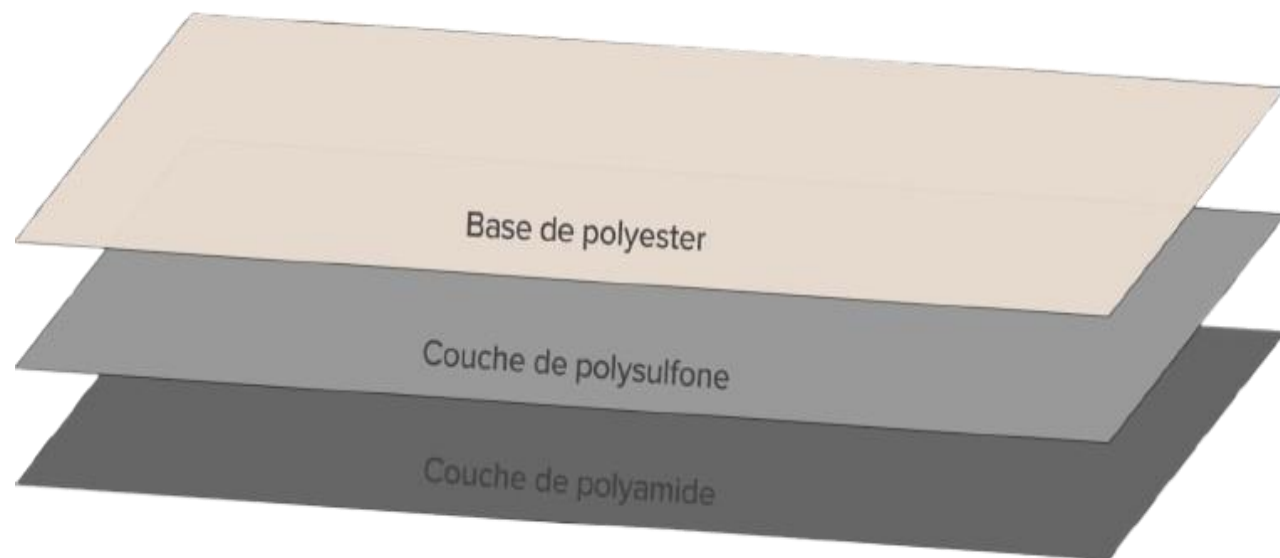


Fig: 9

➤ Base de polyester :

- **Rôle** : support mécanique.

- **Caractéristique** : matériau robuste, résistant, qui sert de fondation aux couches actives.

➤ Couche de polysulfone :

- **Rôle** : couche intermédiaire de soutien.

- **Caractéristique** : bonne résistance chimique et thermique, sert de transition entre le support et la couche sélective.

➤ Couche de polyamide :

- **Rôle** : couche active de filtration.

- **Caractéristique** : très fine, semi-perméable, responsable de l'efficacité du processus de désalinisation ou de purification.

2. Description du système choisie :

❑ De quoi se compose le filtre d'osmose inverse ? :

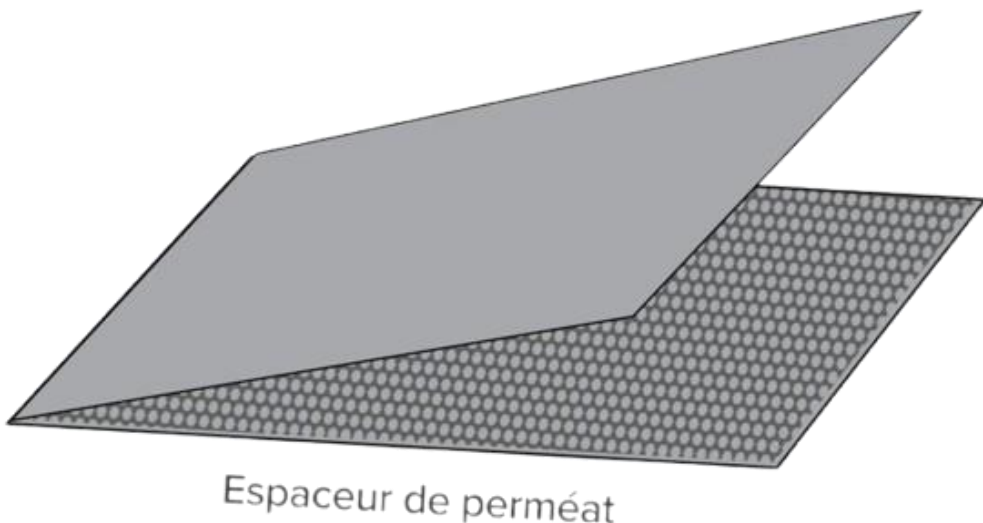


Fig: 10

➤ Espaceur de perméat :

- **Rôle** : maintenir des canaux de circulation pour l'eau filtrée (perméat).
- **Fonction** : empêche l'écrasement des couches de membrane et favorise un écoulement régulier du perméat vers la sortie.
- **Caractéristique** : structure en grille ou filet, légère mais résistante, qui assure une distribution homogène du flux et limite les pertes de charge.

2. Description du système choisie :

❑ De quoi se compose le filtre d'osmose inverse ? :

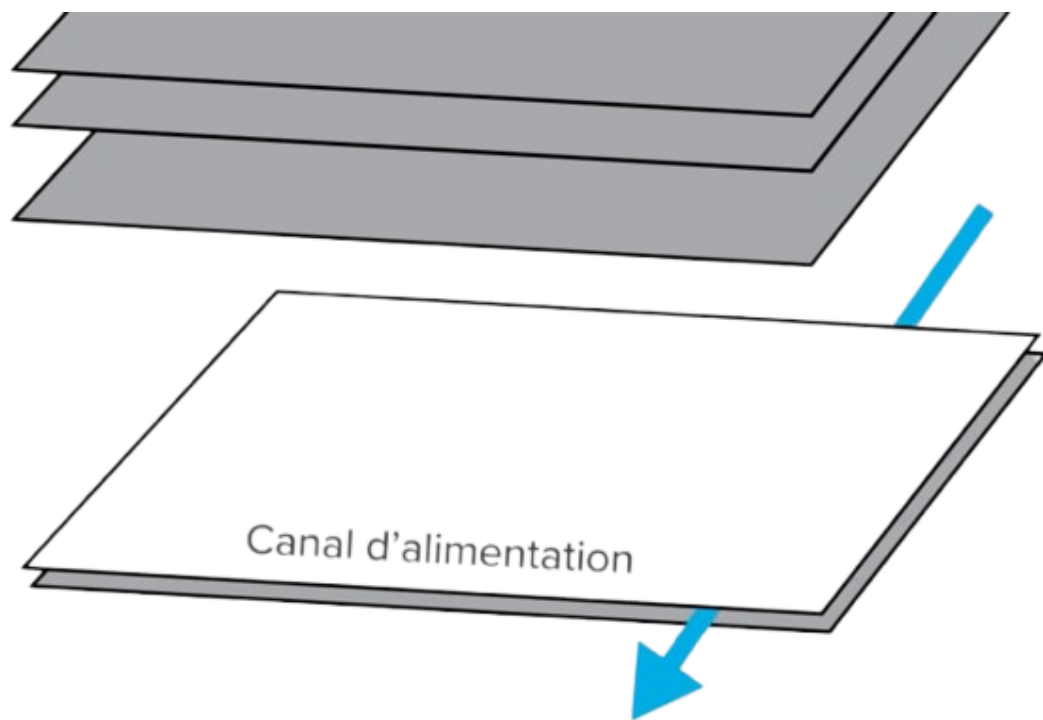


Fig: 11

➤ Canal d'alimentation

- **Rôle** : amener l'eau brute (non filtrée) vers la membrane.
- **Fonction** : distribue le flux d'alimentation de manière homogène à travers les couches du module.
- **Caractéristique** : espaceur ou canal conçu pour maintenir la circulation, réduire les pertes de charge et éviter les zones mortes où l'eau stagnerait.

2. Description du système choisie :

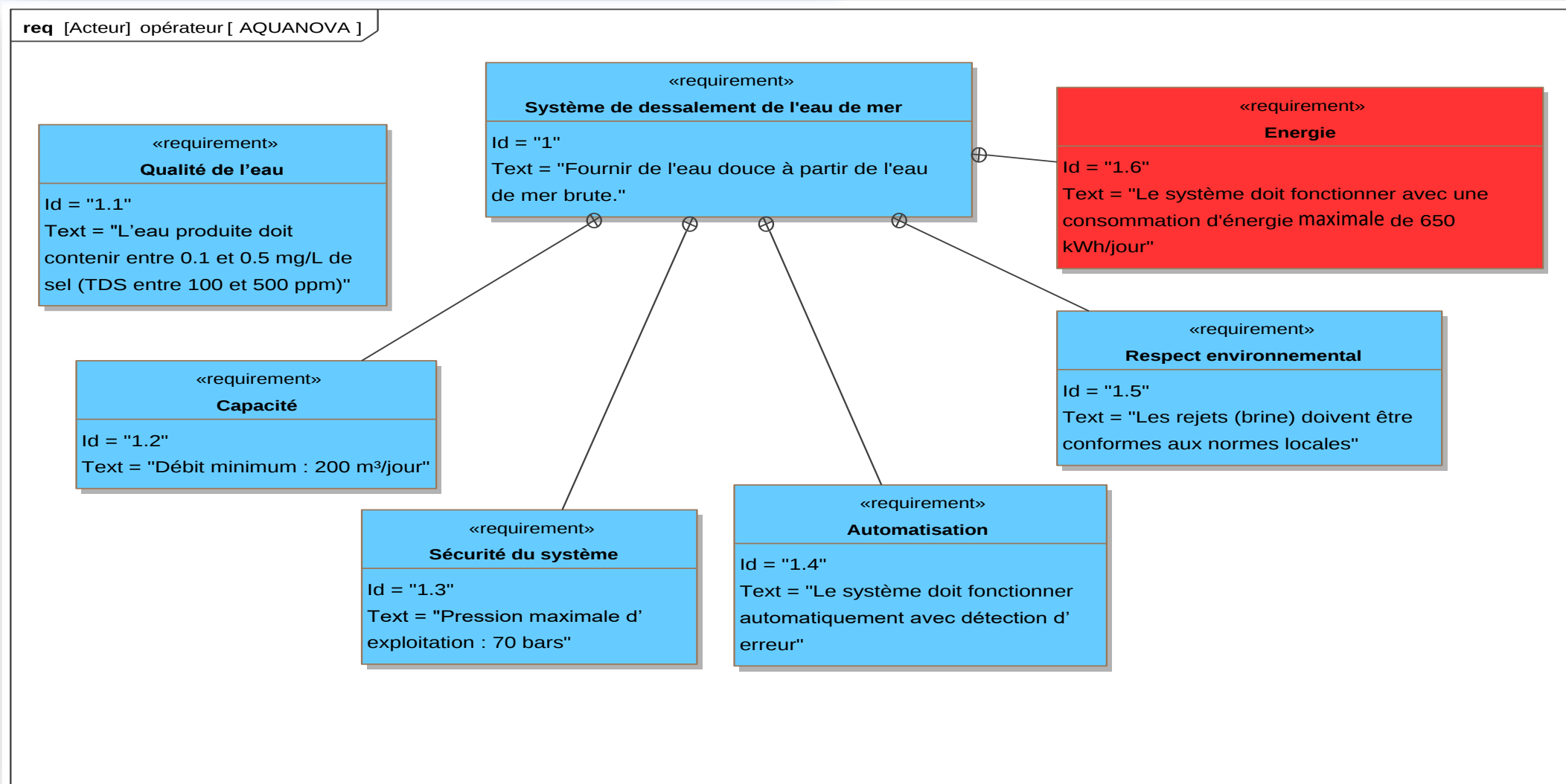


Diagramme d'exigence

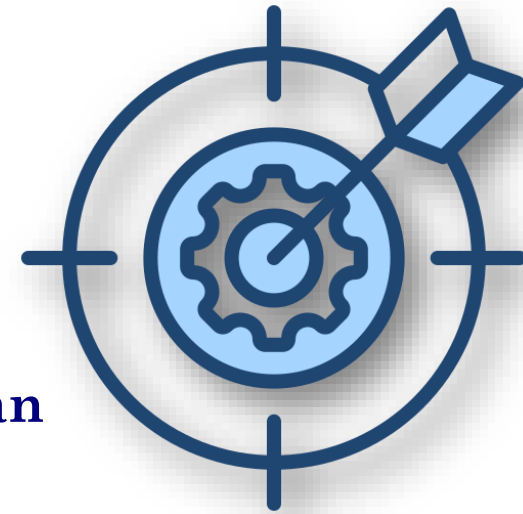
3. Vérification de l'exigence Id : 1.1 (mesure de la salinité) :

But : comparer la salinité réelle de deux types d'eau :

- Eau de robinet (faible teneur en sels).
- Eau excédée en sel (simulation d'une eau saumâtre).

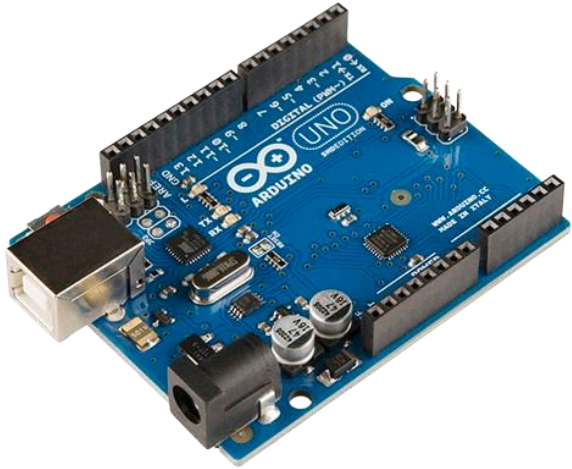
Méthode : mesure directe avec un capteur TDS et affichage sur écran LCD.

Intérêt : démontrer la capacité du prototype à distinguer une eau conforme d'une eau trop salée et valider expérimentalement les exigences de qualité.

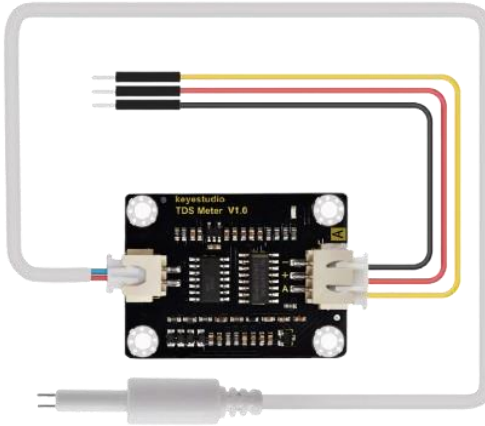


3. Vérification de l'exigence Id : 1.1 (mesure de la salinité) :

➤ Composantes de l'expérience :



Arduino Uno



Capteur TDS V1.0



Écran LCD I2C



- **Échantillons d'eau** : Eau du robinet et eau enrichie en sel pour comparaison.
- **Câblage et alimentation USB** : Assurent la connexion et l'alimentation du montage.

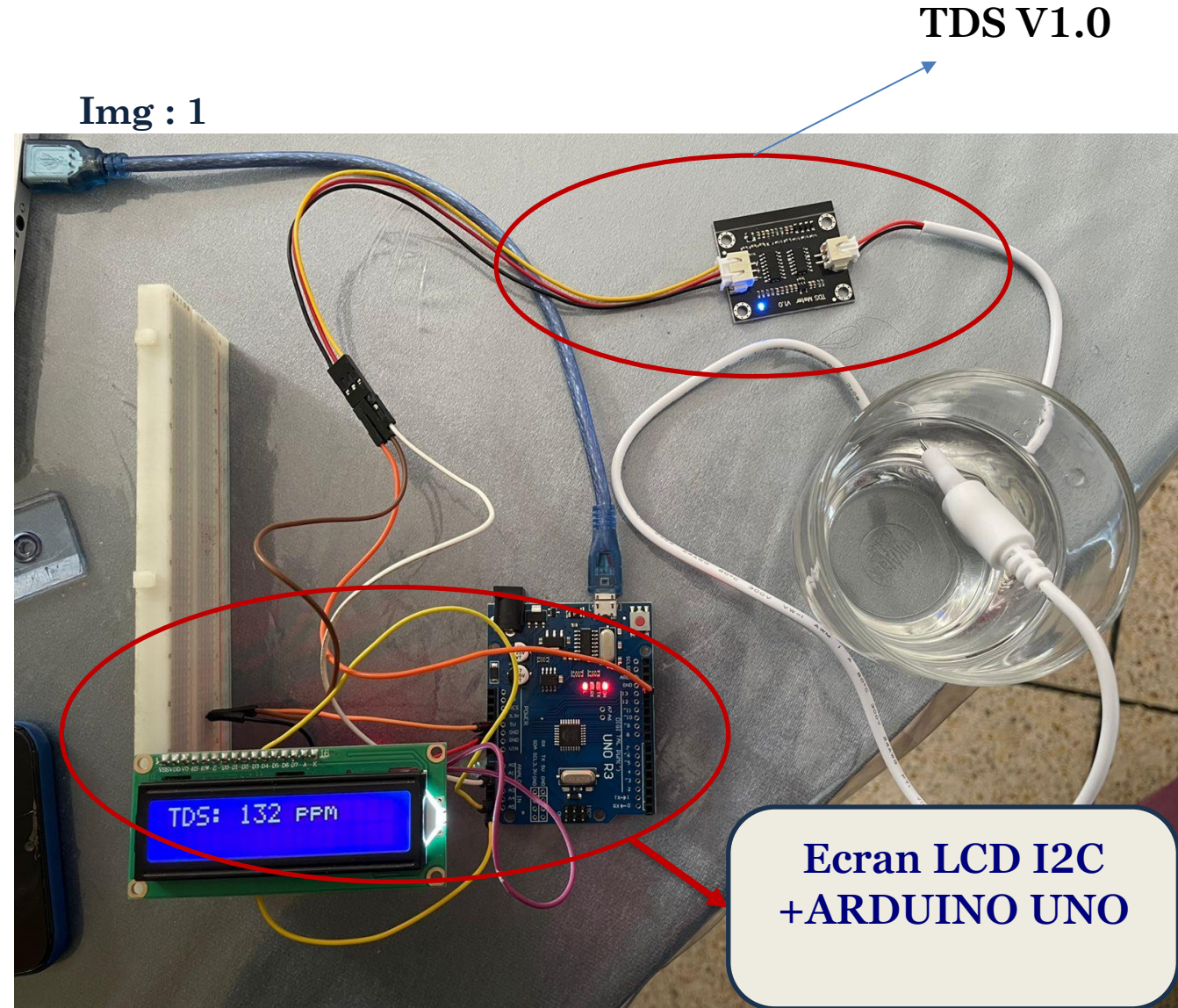
3. Vérification de l'exigence Id : 1.1 (mesure de la salinité) :

➤ Pour l'Eau de robinet :

L'écran LCD affiche une valeur de TDS de 132 ppm pour l'eau du robinet. Avec une **marge d'erreur d'environ $\pm 10\%$** , la salinité réelle se situe **entre 119 et 145 ppm**, ce qui reste conforme à une eau potable.

Résultat:

$$119\text{ppm} \leq 132\text{ppm} \leq 145\text{ppm}$$



3. Vérification de l'exigence Id : 1.1 (mesure de la salinité) :

Eau excédée en sel

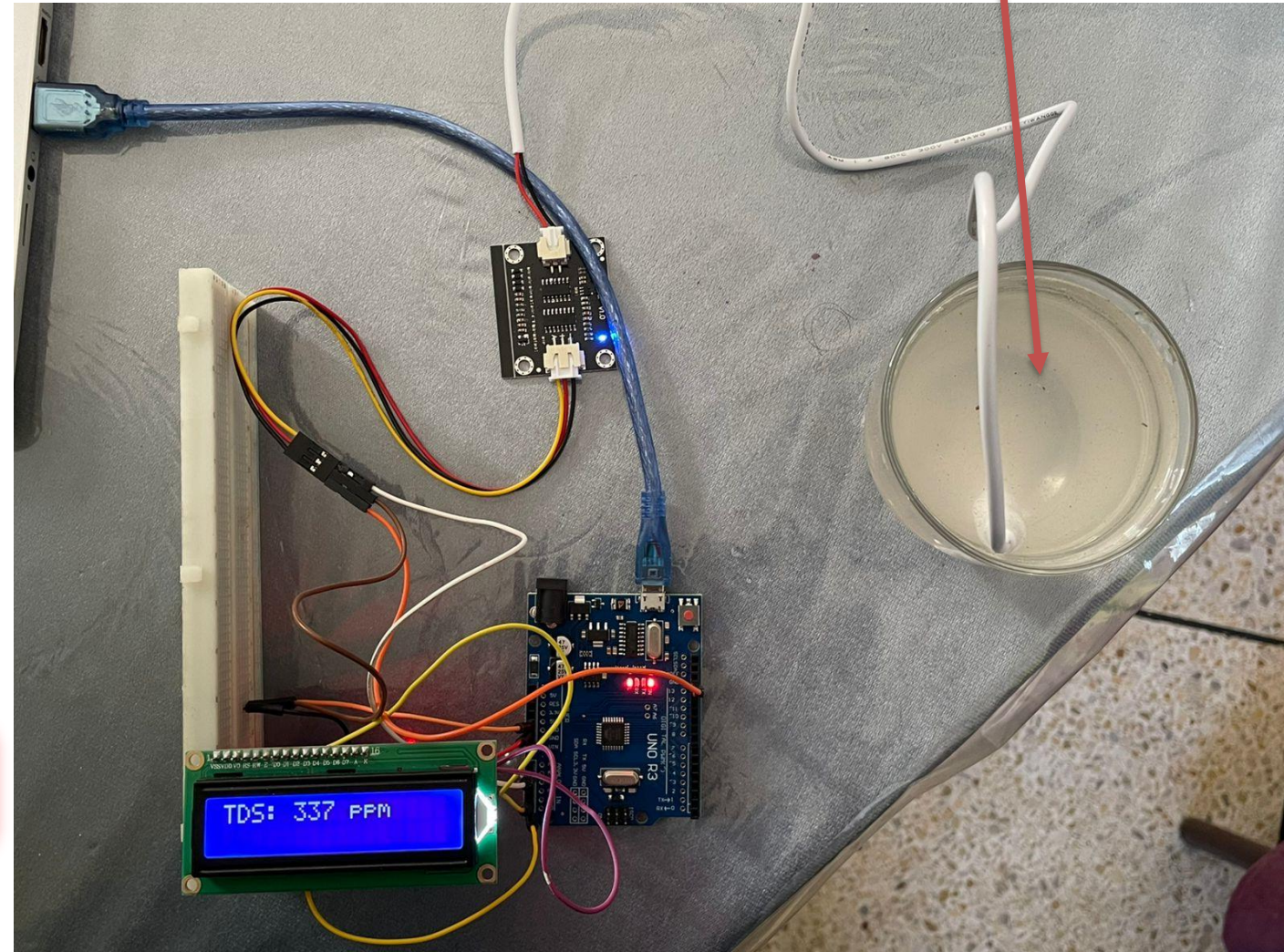
➤ **Pour Eau excédée en sel :**

L'écran LCD affiche une valeur de TDS de 337 ppm pour l'eau enrichie en sel. Avec une marge **d'erreur d'environ $\pm 10\%$** , la valeur réelle se situe **entre 303 et 370 ppm**, confirmant une salinité nettement plus élevée que celle du robinet.

Résultat:

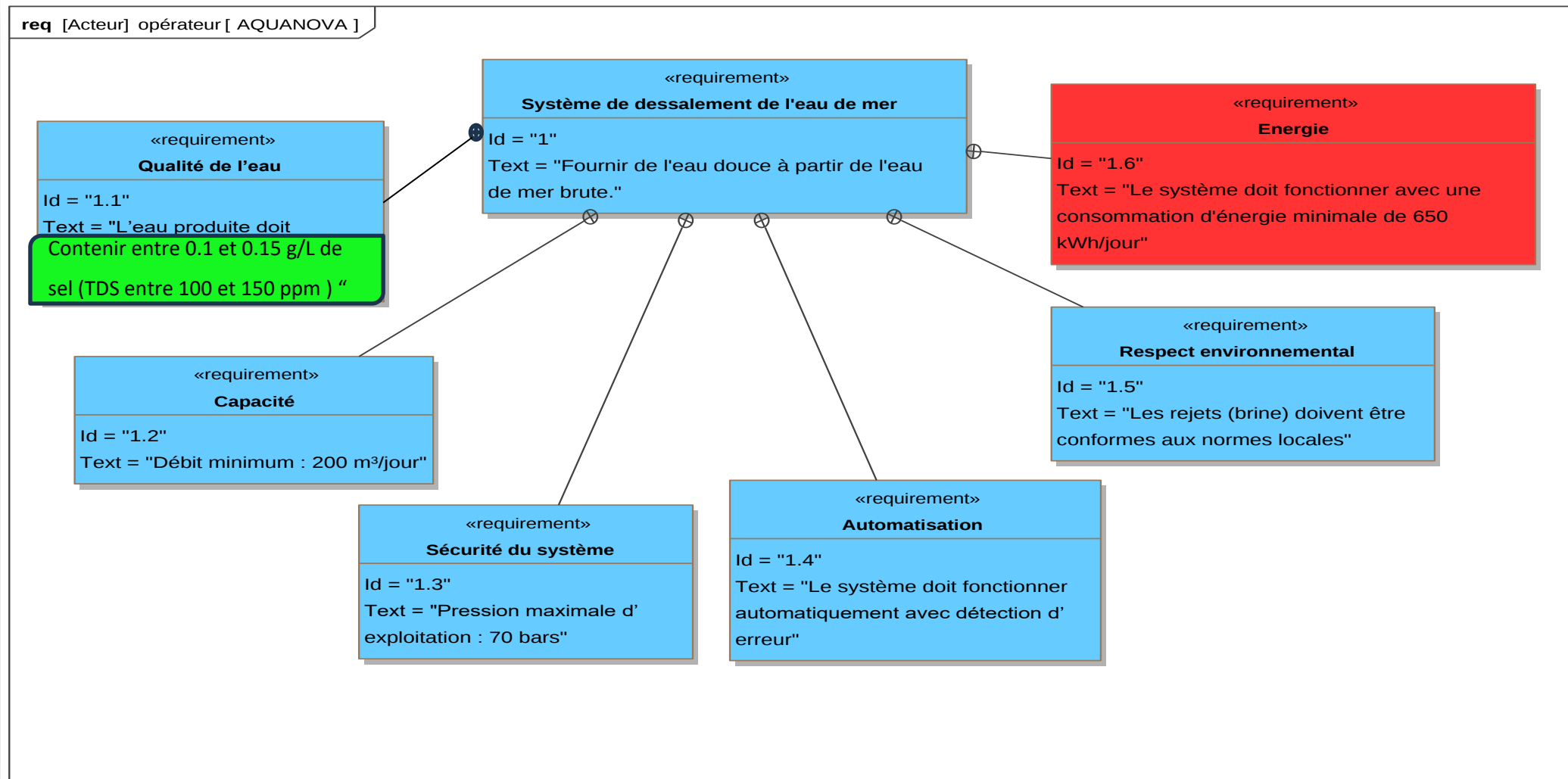
$$303\text{ppm} \leq 337\text{ppm} \leq 370\text{ppm}$$

Img : 2



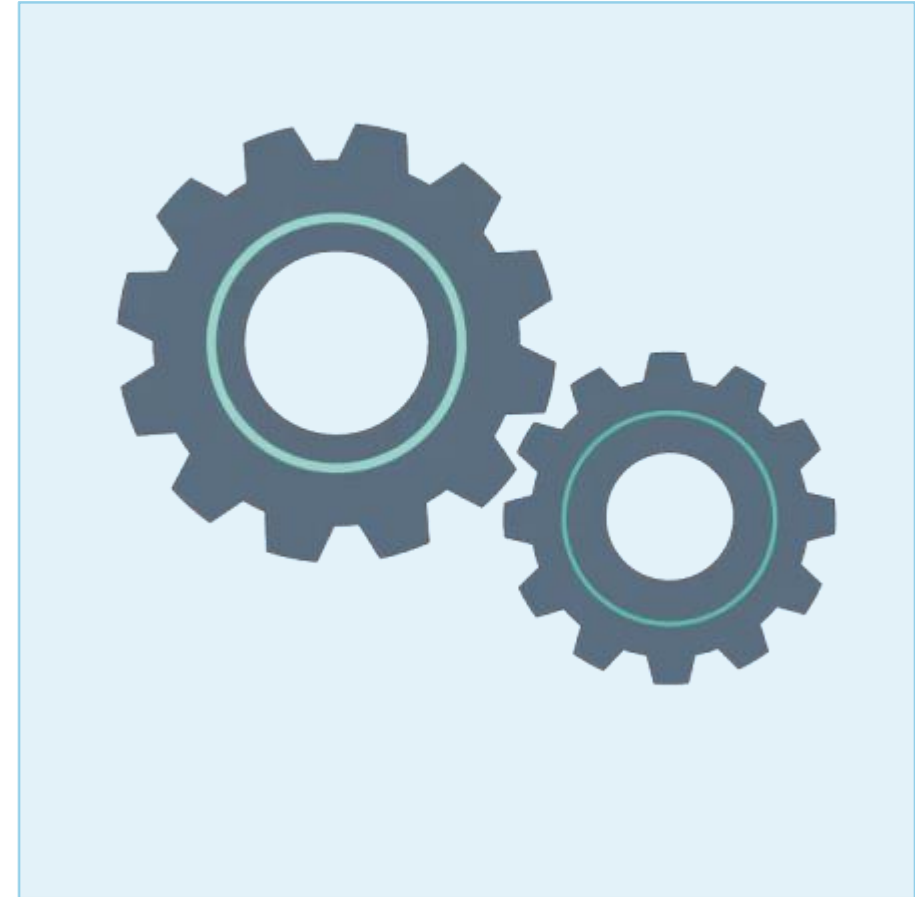
3. Vérification de l'exigence Id : 1.1 (mesure de la salinité) :

➤ Correction de l'exigence Id:1.1 :



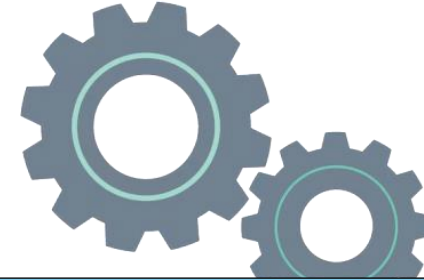
AQUANOVA

□ **Choix du moteur:** (Moto-pompe)



4. Choix du moteur: Moto-pompe

➤ Données d'entrée :



Paramètre	Valeur	Unité	Justification
Volume journalier V	200	m ³ /jour	Capacité de production du projet
Durée journalière t	86 400	s/jour (24 h)	Fonctionnement continu 24 h/24
Pression différentielle ΔP	70	bar	Standard osmose inverse eau de mer
Rendement global η	75	%	Valeur réaliste pompe + moteur
Vitesse de rotation N	2 900	tr/min	Vitesse standard moteur 50 Hz

4. Choix du moteur: Moto-pompe

Données d'entrée	
Débit journalier	$V = 200 \text{ m}^3/\text{jour}$
Durée d'exploitation	$t = 86\,400 \text{ s/j (24 h)}$
Pression différentielle	$\Delta P = 70 \text{ bar}$
Rendement pompe	$\eta = 75 \%$
Vitesse de rotation	$N = 2\,900 \text{ tr/min}$

Relations utilisées		
1	$Q = \frac{V}{t}$	Débit volumique (m^3/s)
2	$P_h = Q \cdot \Delta P$	Puissance hydraulique (W)
3	$P_m = \frac{P_h}{\eta}$	Puissance moteur (W)
4	$\omega = 2\pi \cdot N$	Vitesse angulaire (rad/s)
5	$C = \frac{P_m}{\omega}$	Couple moteur ($\text{N}\cdot\text{m}$)

4. Choix du moteur: Moto-pompe

➤ Application des relations utilisées :

1 Débit volumique

$$Q = V/t = 200 / 86\,400$$

$$Q = 2,315 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{soit } 8,33 \text{ m}^3/\text{h}$$

2

Puissance hydraulique

$$P_h = Q \times \Delta P = 2,315 \times 10^{-3} \times 7 \times 10^6 \text{ Pa}$$

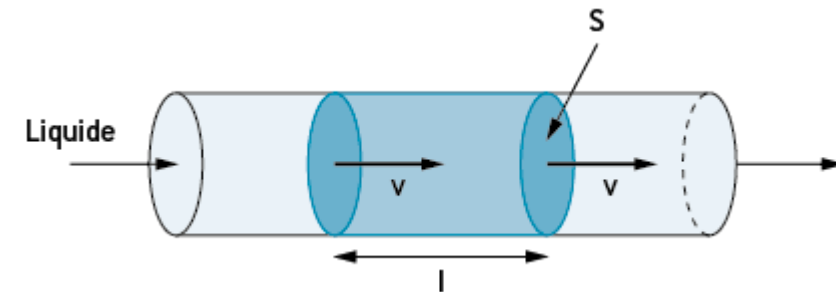
$$P_h = 16\,204 \text{ W} \approx 16,2 \text{ kW}$$

3

Puissance moteur

$$P_m = P_h / \eta = 16\,204 / 0,75$$

$$P_m = 21\,605 \text{ W} \approx 21,6 \text{ kW}$$



4. Choix du moteur: Moto-pompe

➤ Application des relations utilisées :

4 Vitesse angulaire

$$N \text{ en tr/s} \rightarrow N = 2\,900 / 60 = 48,33 \text{ tr/s}$$

$$\omega = 2\pi \times N = 2\pi \times 48,33$$

$$\omega = 303,7 \text{ rad/s}$$

5 Couple moteur

$$C = P_m / \omega = 21\,605 / 303,7$$

$$C = 71,1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Récapitulatif

Q	P_h	P_m	ω	C
$2,315 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	16,2 kW	21,6 kW	303,7 rad/s	71,1 N·m

4. Choix du moteur: Moto-pompe



Critère	Valeur requise	Grundfos CRN 3-SF	Conformité
Puissance moteur P_m	$\geq 21,6$ kW	22 kW	✓
Pression max ΔP	≥ 70 bar	≥ 70 bar (série)	✓
Débit nominal Q	$\sim 8,33$ m ³ /h	1,2 – 10 m ³ /h	✓
Vitesse de rotation N	2 900 tr/min	2 900 tr/min	✓
Rendement η	75 %	90 % pour une seule pompe	✓

Moto-pompe retenue :

Grundfos CRN 3-SF

Pompe centrifuge multicellulaire | 22 kW | ≥ 70 bar (série) | ≥ 75 % | 2 900 tr/min

4. Choix du moteur: Moto-pompe

Moteurs standards pour CR, CRI, CRN, 50 Hz



Moteur P2 [kW]	Taille	Tension standard [V]	$I_{1/1}$ [A]	$\cos \varphi_{1/1}$	Classe de rendement	η [%]	I_{start} [%]	Vitesse [min ⁻¹]	MG
0,37	71	220-240Δ / 380-415Y	1,74 / 1,00	0,80-0,70	-	78,5	490-530	2850-2880	
0,55	71	220-240Δ / 380-415Y	2,50 / 1,44	0,80-0,70	-	80,0	580-620	2830-2850	
0,75	80	220-240Δ / 380-415Y	3,30 / 1,90	0,81-0,71	IE3	80,7	580-620	2840-2870	
1,1	80	220-240Δ / 380-415Y	4,35 / 2,50	0,83-0,76	IE3	82,7	450-500	2840-2870	
1,5	90	220-240Δ / 380-415Y	5,45 / 3,15	0,87-0,82	IE3	84,2	850-930	2890-2910	
2,2	90	380-415Δ	4,45	0,89-0,87	IE3	85,9	850-950	2890-2910	
3,0	100	380-415Δ	6,30	0,87-0,82	IE3	87,1	840-920	2900-2920	
4,0	112	380-415Δ	7,90	0,87	IE3	88,1	1000-1110	2920-2940	
5,5	132	380-415Δ	11,0	0,87-0,82	IE3	89,2	1080-1180	2920-2940	
7,5	132	380-415Δ / 660-690Y	14,4-14,0 / 8,30-8,10	0,88-0,82	IE3	90,4	780-910	2910-2920	
11	160	380-415Δ / 660-690Y	20,8-19,8 / 12,0-11,8	0,88-0,84	IE3	91,2	660-780	2940-2950	
15	160	380-415Δ / 660-690Y	28,0-26,0 / 16,2-15,6	0,89-0,87	IE3	91,9	660-780	2930-2950	
18,5	160	380-415Δ / 660-690Y	34,5-32,5 / 20,0-18,8	0,89-0,85	IE3	92,4	830-980	2940-2950	
22	180	380-415Δ / 660-690Y	39,5 / 22,8	0,90	IE3	92,7	830-830	2950	



TM03 1711 2805

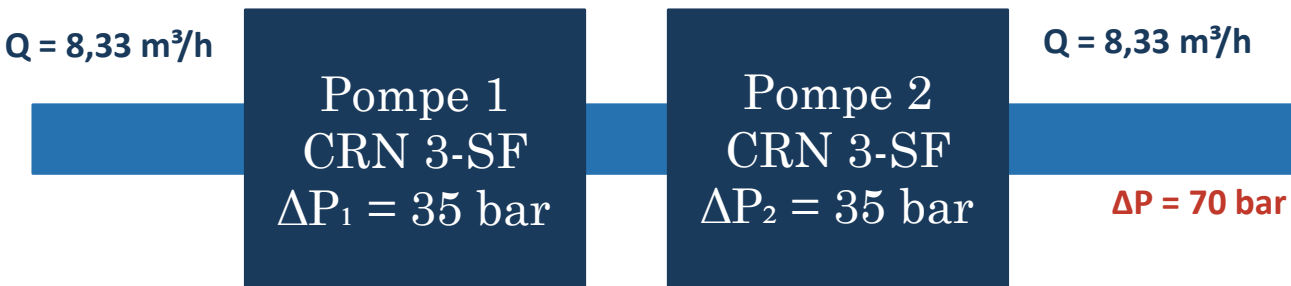
Moteur Grundfos série MG — 22 kW

II. objectifs : Évaluer l'efficacité énergétique :



1. Pompes en série : bilan énergétique :

➤ Schéma hydraulique :



→ Pression : $\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 70 \text{ bar}$

= Débit : Q reste constant = 8,33 m³/h

+ Puissance : $P_{\text{m_total}} = P_{\text{m1}} + P_{\text{m2}} = 21,6 \text{ kW}$

Tableau comparatif

Paramètre	1 pompe 22 kW	2 pompes série
Débit Q	8,33 m³/h	8,33 m³/h
Pression ΔP	70 bar	35+35 = 70 bar
Ph hydraulique	16,2 kW	8,1+8,1 kW
Rendement η	75 %	$90\%^2 = 81\%$
P_m par moteur	22 kW	10,8 kW × 2
P_m TOTALE	22 kW	21,6 kW
Disponibilité	Standard	Très standard

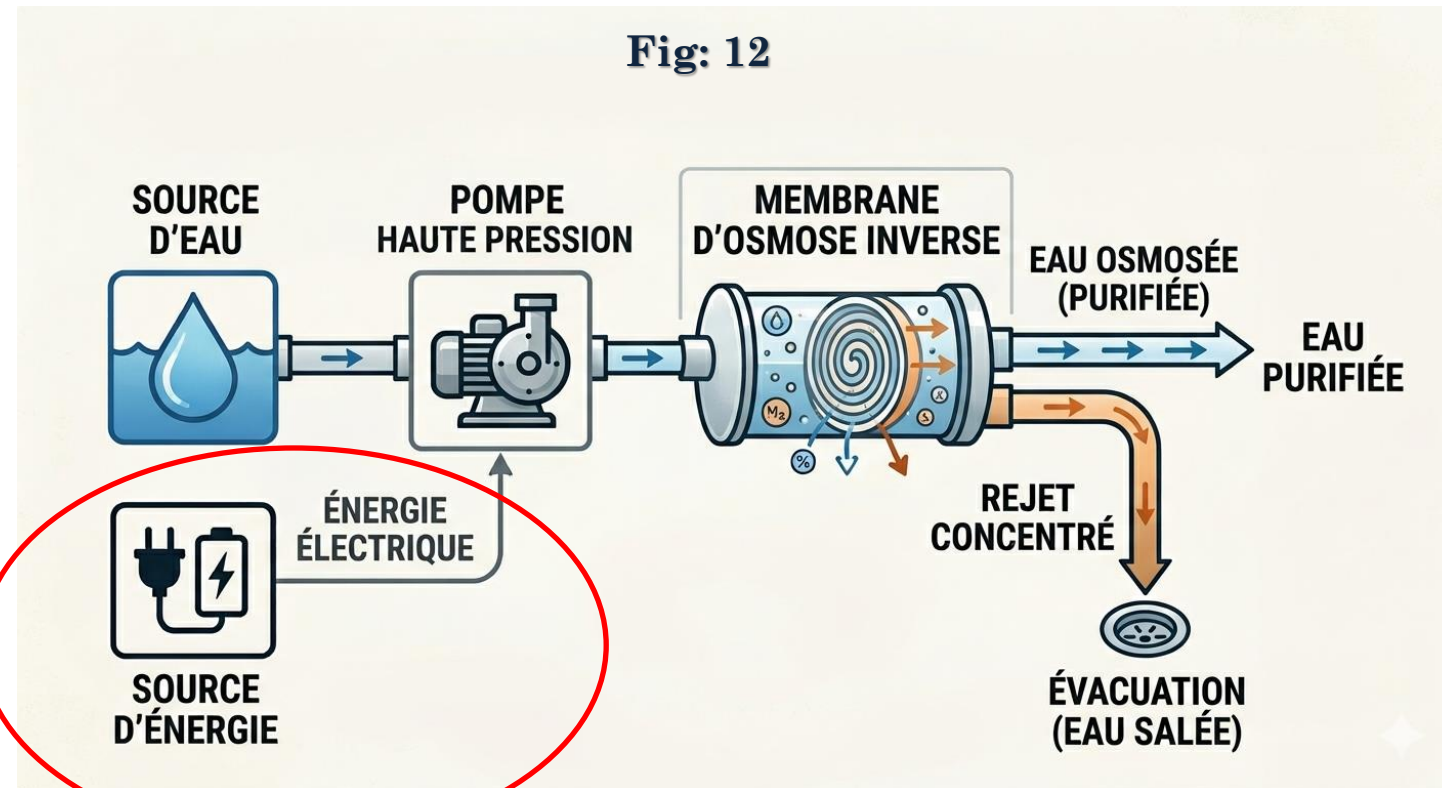
Conclusion :



2 pompes en série = même consommation totale ($\approx 22 \text{ kW}$) qu'une seule pompe 22 kW — mais avec des équipements standard 35 bar plus accessibles, moins coûteux et avec redondance opérationnelle.

2. Alimentation en énergie de la station

- Le système nécessite une puissance moteur de $\approx 22 \text{ kW}$ pour fonctionner.
- Consommation journalière estimée : $\approx 518 \text{ kWh/jour}$ pour 200 m^3 d'eau douce.
- Importance d'une source **renouvelable et durable** pour réduire l'impact environnemental.



Puisque notre système est installé en zone maritime, il est pertinent d'explorer les énergies renouvelables issues de la mer pour répondre à ce besoin.

2. Alimentation en énergie de la station

Énergie marémotrice (Tidal Energy)

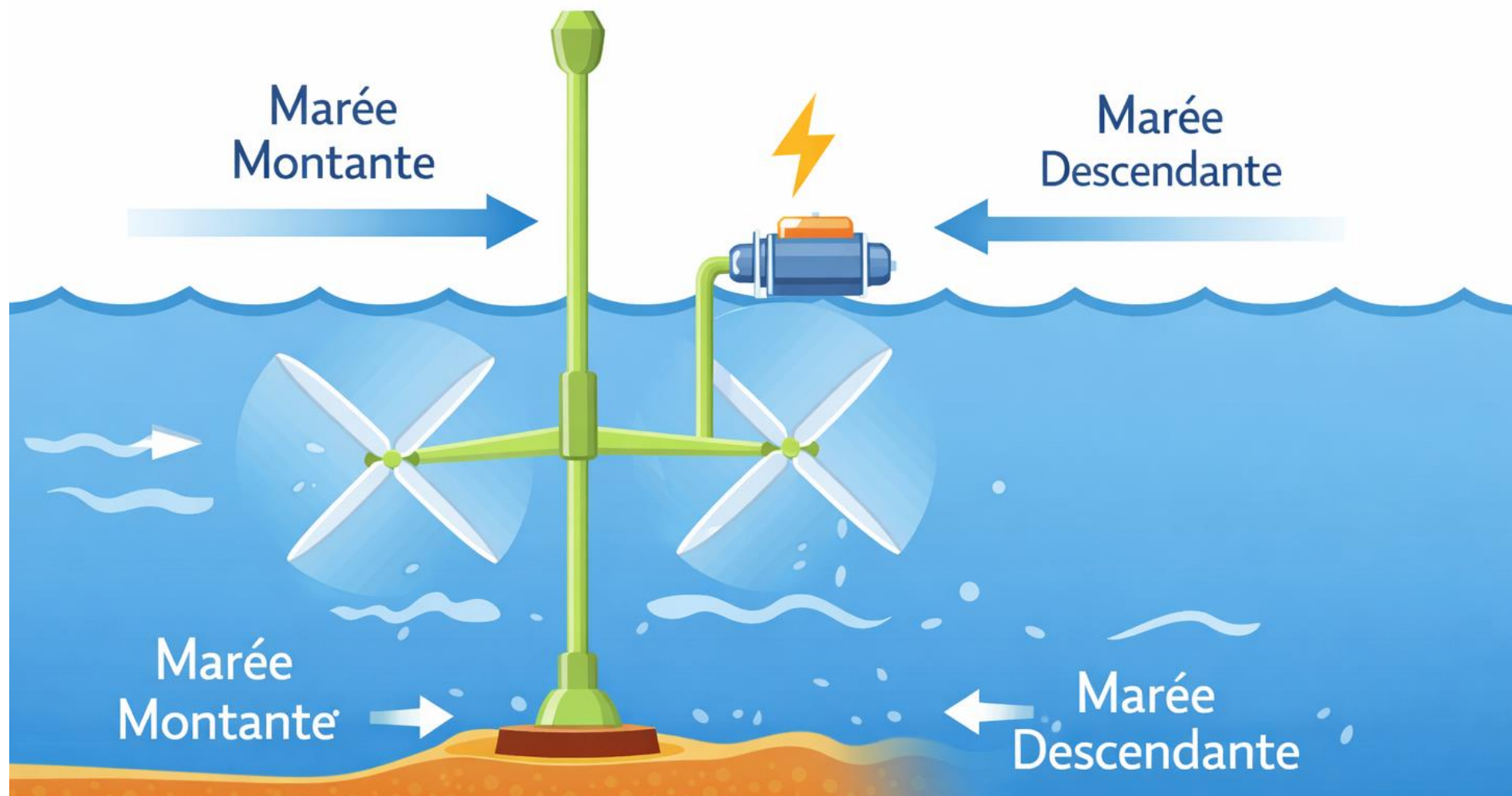


Fig: 13

2. Alimentation en énergie de la station

36

Énergie houlomotrice (Wave Energy)

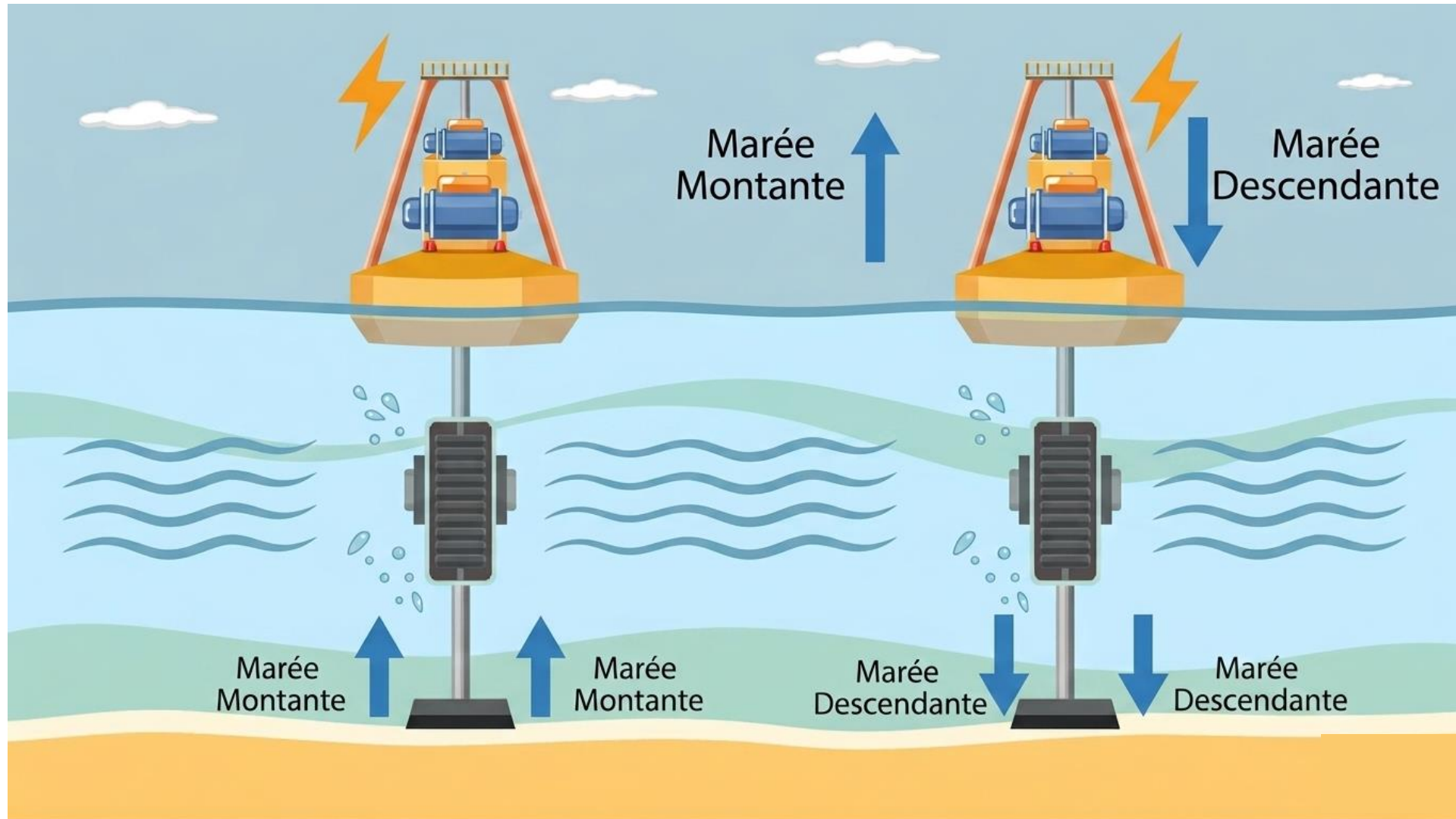


Fig: 14

2. Alimentation en énergie de la station

➤ Étude comparative des deux sources d'énergie pour l'Atlantique marocain :

□ Données d'entrée :

Paramètre	Symbole	Valeur typique	Unité	Remarque
Masse volumique de l'eau	ρ	1000	kg/m ³	Constante physique
Gravité	g	9,81	m/s ²	Constante physique
Hauteur de marée	H	2	m	Marée moyenne Atlantique
Débit par turbine marémotrice	Q	1,2	m ³ /s	Estimation petite installation
Hauteur significative des vagues	H _s	2,5	m	Données Agadir–Essaouira
Période des vagues	T	8	s	Moyenne Atlantique central
Largeur de front de vague	L	1	m	Calcul par mètre de côte

2. Alimentation en énergie de la station

➤ Étude comparative des deux sources d'énergie pour l'Atlantique marocain :-

Énergie marémotrice (Tidal Energy)

- **Sites identifiés :** Détroit de Gibraltar et zones côtières atlantiques avec courants stables.
- **Relation utilisée :** $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$ (puissance théorique d'une turbine/pompe)
- **Paramètres typiques :**
 - $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 - $H \approx 2 \text{ m}$ (différence de marée moyenne)
 - $Q \approx 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit estimé par turbine)
- **Résultat :**

$$P \approx 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,2 \cdot 2 \approx 23,6 \text{ kW} > 22 \text{ kW}$$

2. Alimentation en énergie de la station

➤ Étude comparative des deux sources d'énergie pour l'Atlantique marocain :

Énergie houlomotrice (Wave Energy)

- Sites identifiés : côte centrale entre Agadir et Essaouira.
- Relation utilisée (puissance par mètre de front de vague) :
- Paramètres typiques (Atlantique marocain) :

$$P = \frac{\rho \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \times H_s^2 \cdot T$$

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$H_s \approx 2,5 \text{ m}$ (hauteur significative des vagues)

$T \approx 8 \text{ s}$ (période moyenne)

- Résultat :

$$P = \frac{1000 \cdot 9,81^2}{64 \cdot \pi} \times (2,5)^2 \cdot 8 \approx 25 \text{ kW/m}$$

> 22 kW

2. Alimentation en énergie de la station

➤ Étude comparative des deux sources d'énergie pour l'Atlantique marocain :

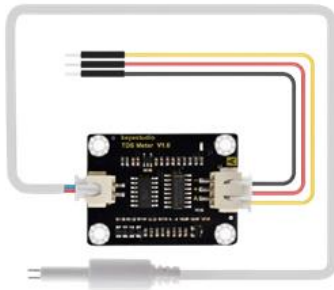
Critère	Marémotrice	Houlomotrice
Stabilité	Très élevée (cycles astronomiques)	Moyenne (dépend météo)
Puissance disponible	~23 kW par turbine	~25 kW/m de front de vague
Maturité technologique	Déjà exploitée (La Rance, France)	En développement (Pelamis, CETO)
Stabilité	Très élevée (cycles astronomiques prévisibles)	Moyenne (dépend météo et saisons)
Adaptation au système	Idéal pour alimentation continue	Innovant comme complément

III. objectifs : Étudier la qualité de l'eau produite :



Réalisation d'une expérience :

➤ Architecture & Composants du prototype :



Arduino Uno

Capteur TDS V1.0

Écran LCD I2C

Pompe DC 5V

H L298N

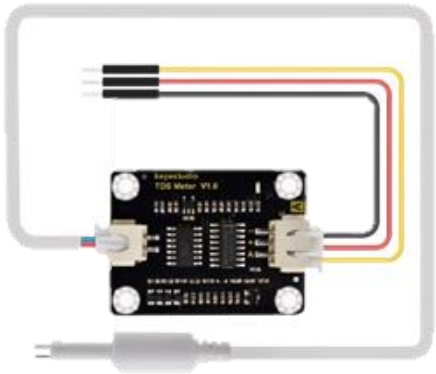


•**Échantillon d'eau** : eau enrichie en sel

•**Câblage et alimentation USB** : Assurent la connexion et l'alimentation du montage.

Réalisation d'une expérience :

➤ Capteur TDS V1.0 : **Caractéristiques Techniques**



Capteur TDS V1.0

Paramètre	Spécification
Tension d'Entrée	DC 3.3 ~ 5.5 V (Compatible 3.3 V et 5 V)
Signal de Sortie	Analogique 0 ~ 2.3 V
Courant de Travail	3 ~ 6 mA
Plage de Mesure TDS	0 ~ 1000 ppm (Parties par Million)
Précision de Mesure	± 10% F.S. (à 25 °C)
Type de Sonde	Bipolaire, Étanche (Waterproof)

Réalisation d'une expérience :

➤ Architecture & Composants du prototype :

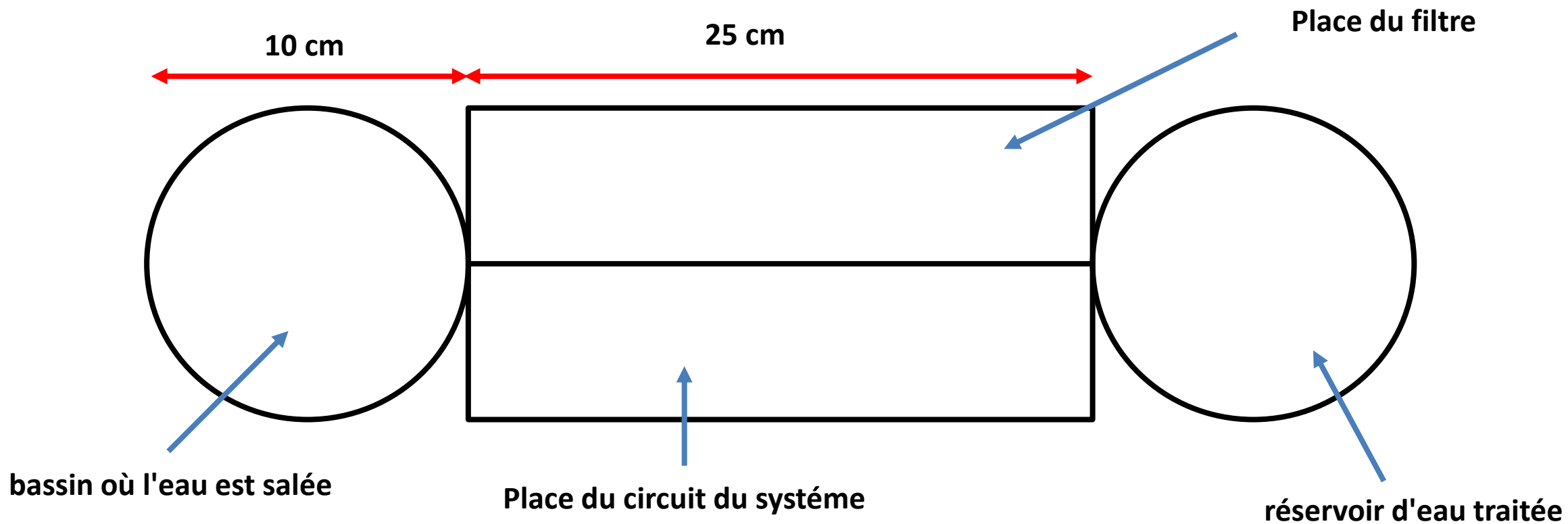


Fig: 15

Réalisation d'une expérience :

➤ Algorithme du travail du système :

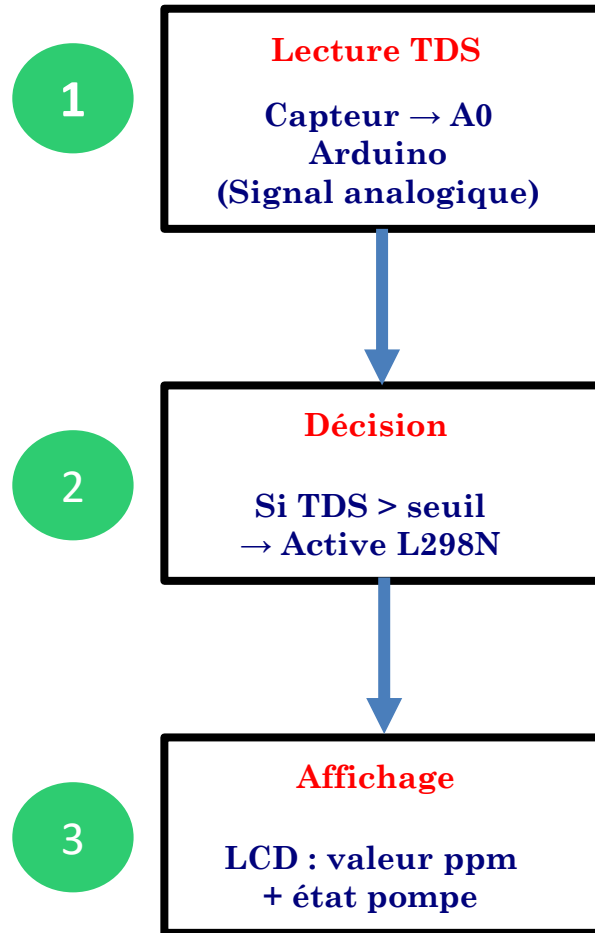


Fig: 16

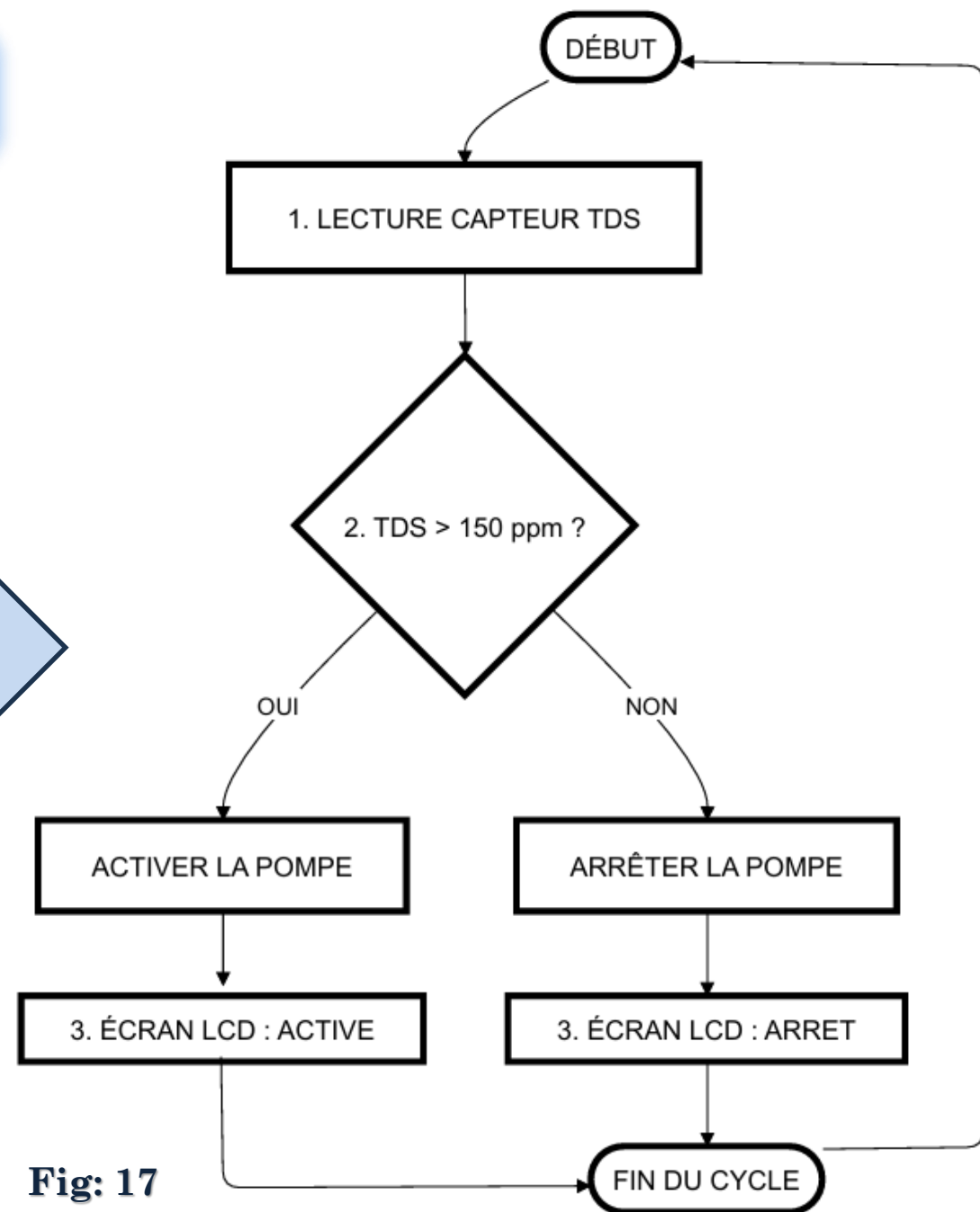
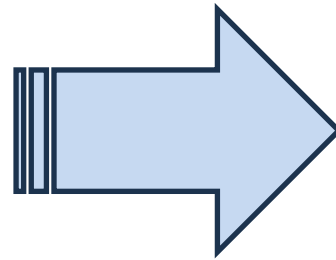


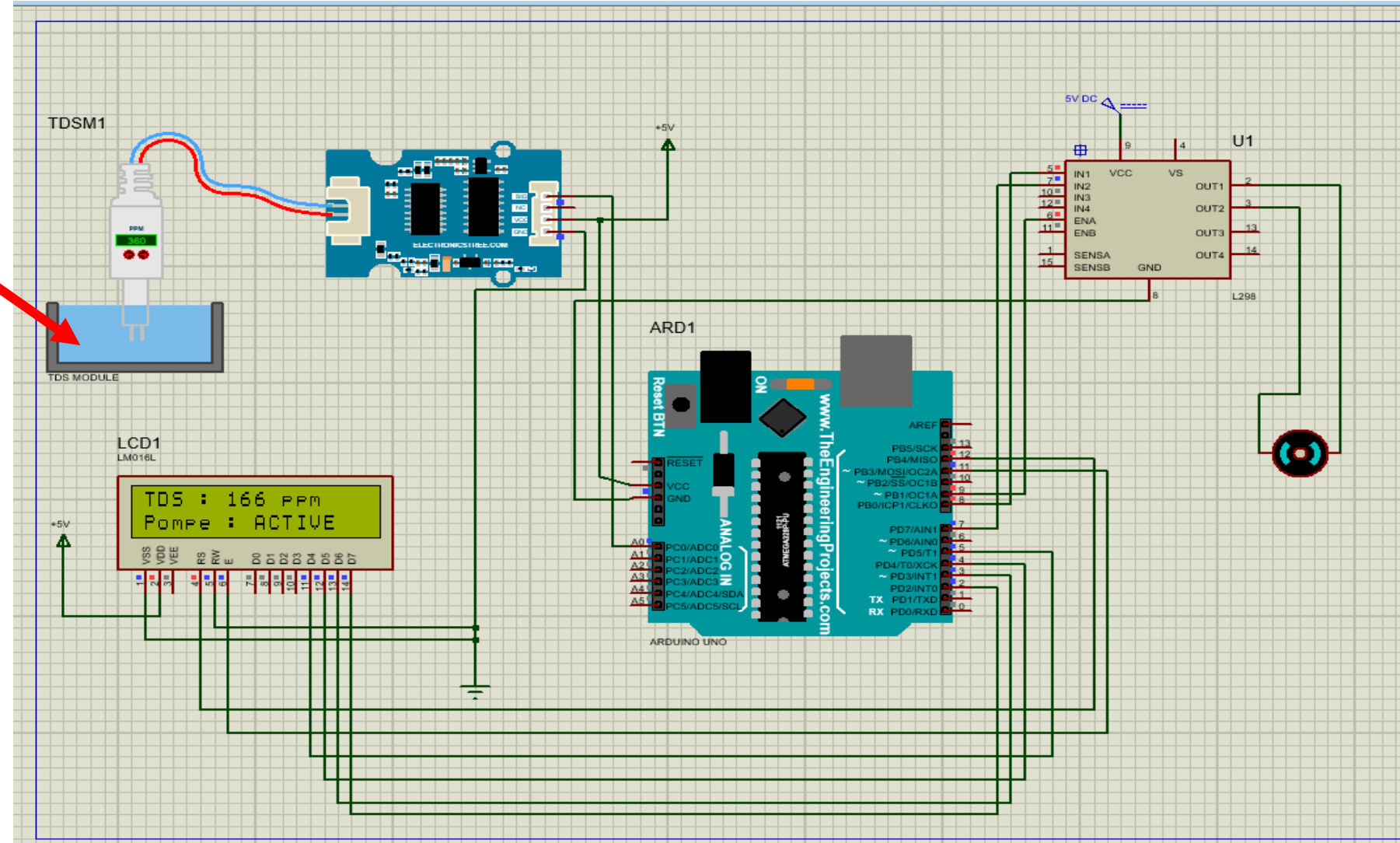
Fig: 17

Réalisation d'une expérience :

➤ Schéma de simulation — ISIS Proteus

Img : 3

Eau salée

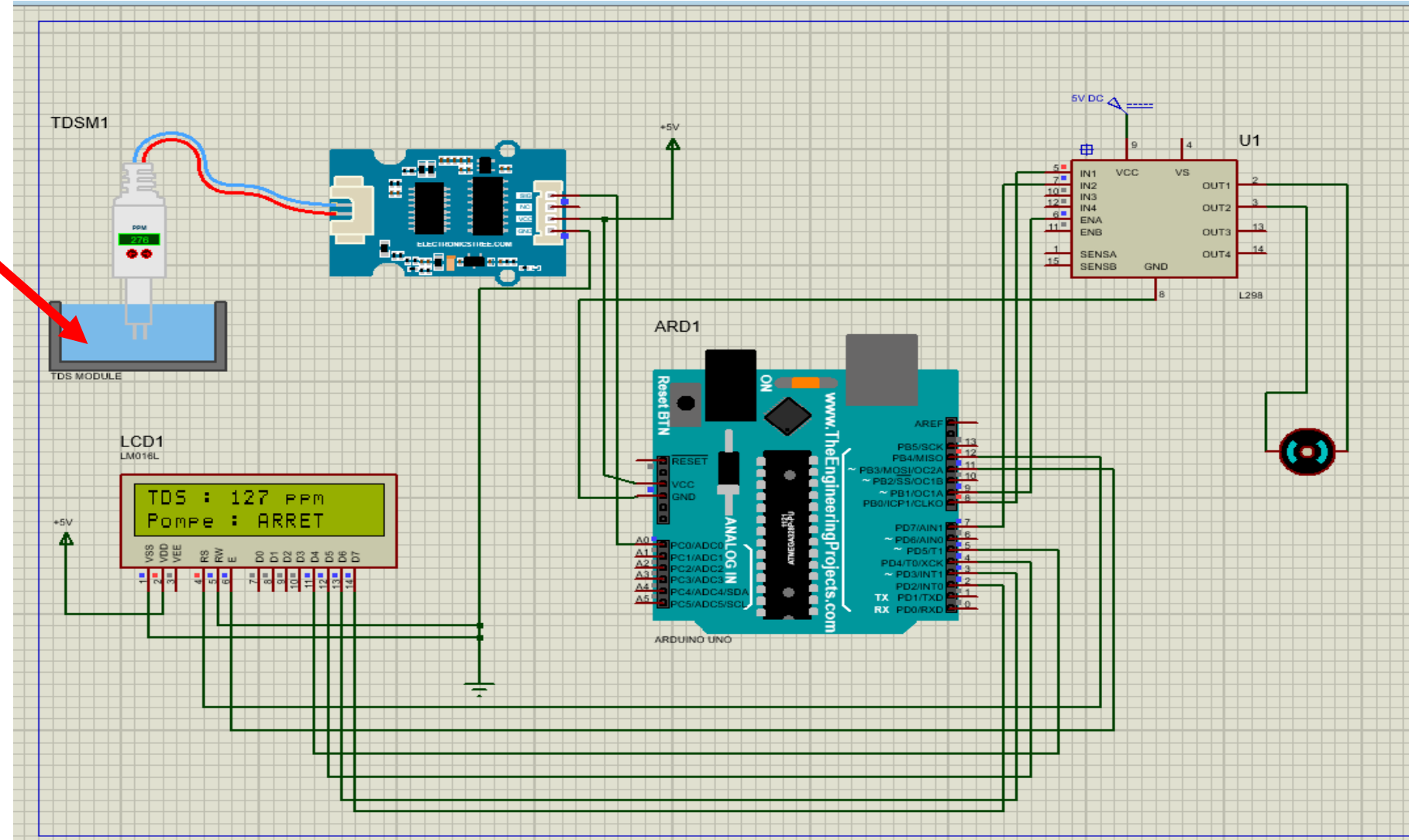


Réalisation d'une expérience :

➤ Schéma de simulation — ISIS Proteus

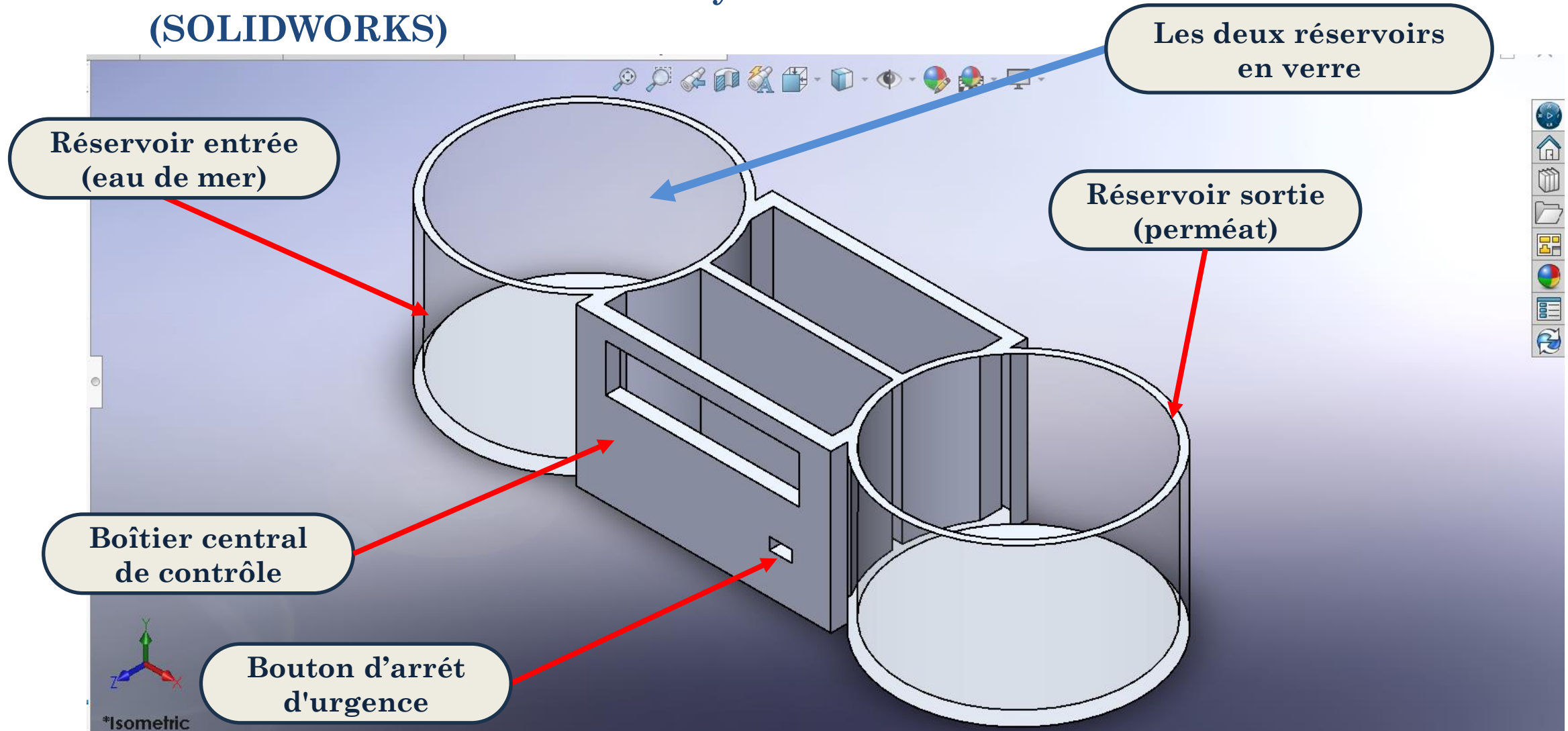
Img : 4

Eau potable



Réalisation d'une expérience :

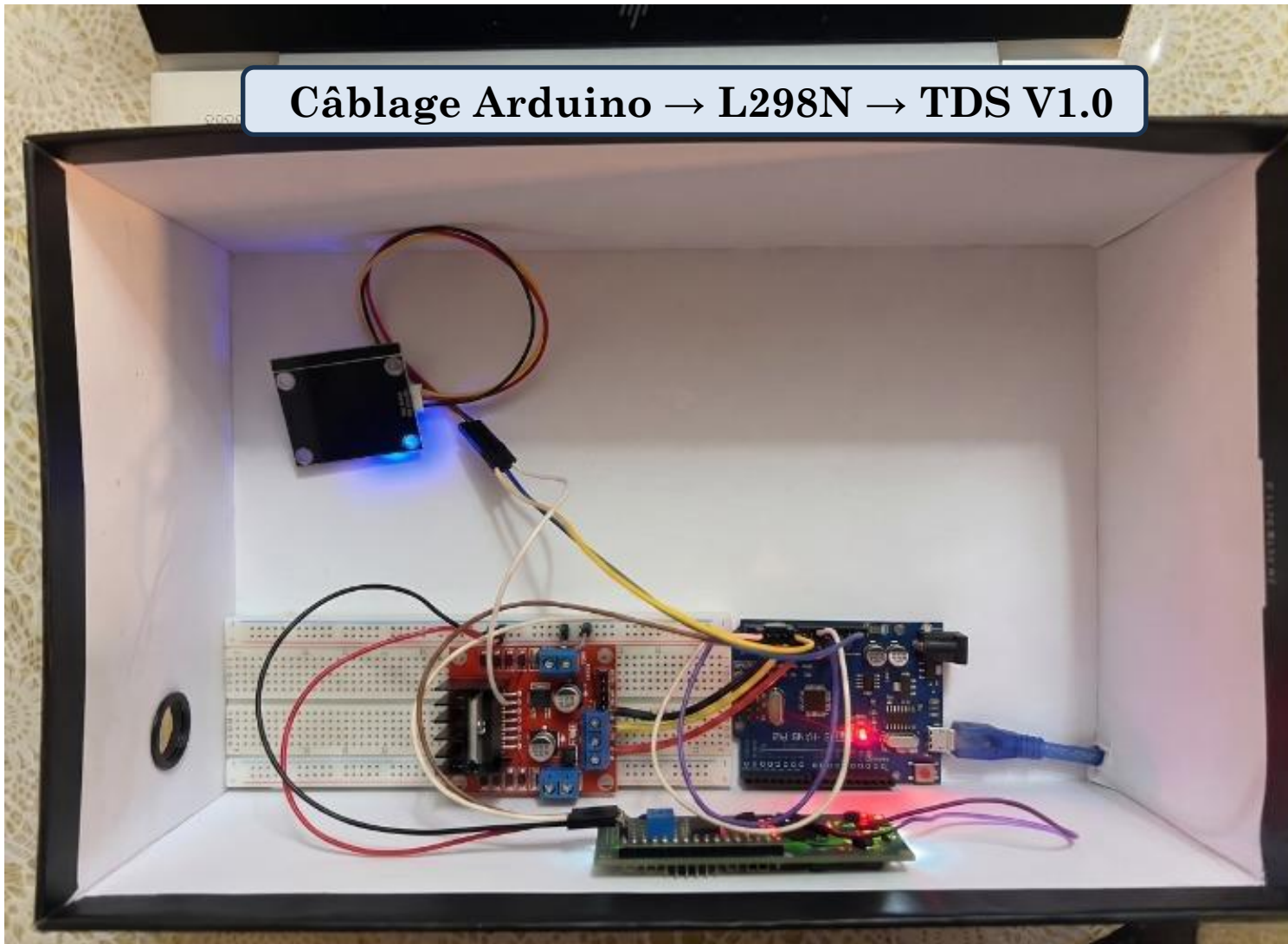
- Modélisation 3D du cadre du système : (SOLIDWORKS)



Img : 5

Réalisation d'une expérience :

- Réalisation physique du prototype :



Img : 6

Réalisation d'une expérience :

➤ Réalisation physique du prototype :

Img : 7

Tuyau flexible

Coton

Polyamide

Espaceur de perméat

Flacons en plastique

Polysulfone

Polyester

Les éléments du filtre



Réalisation d'une expérience :

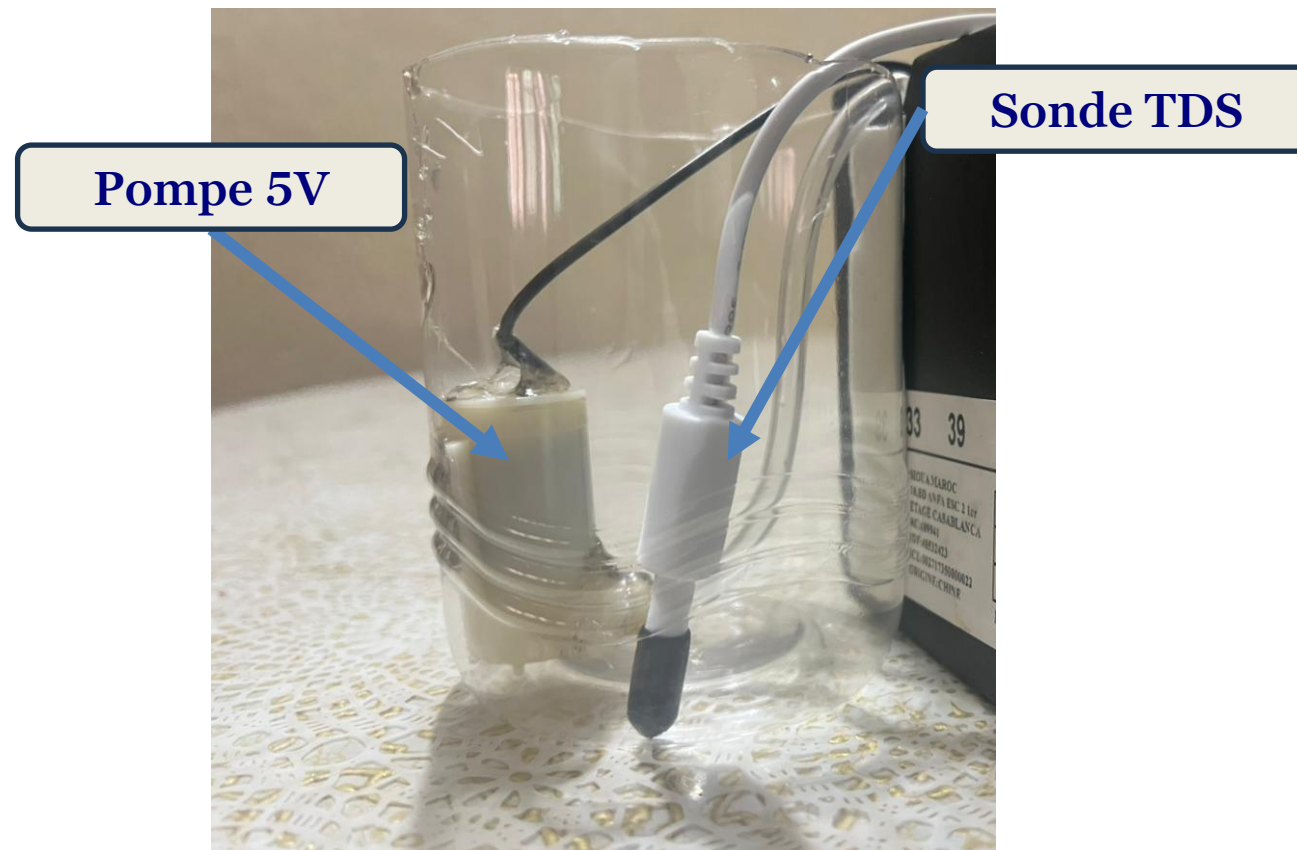
- Réalisation physique du prototype :



FILTRE OBTENU

Img : 8

Img : 9



Pompe 5V

Sonde TDS

positionnement du pompe

Réalisation d'une expérience :

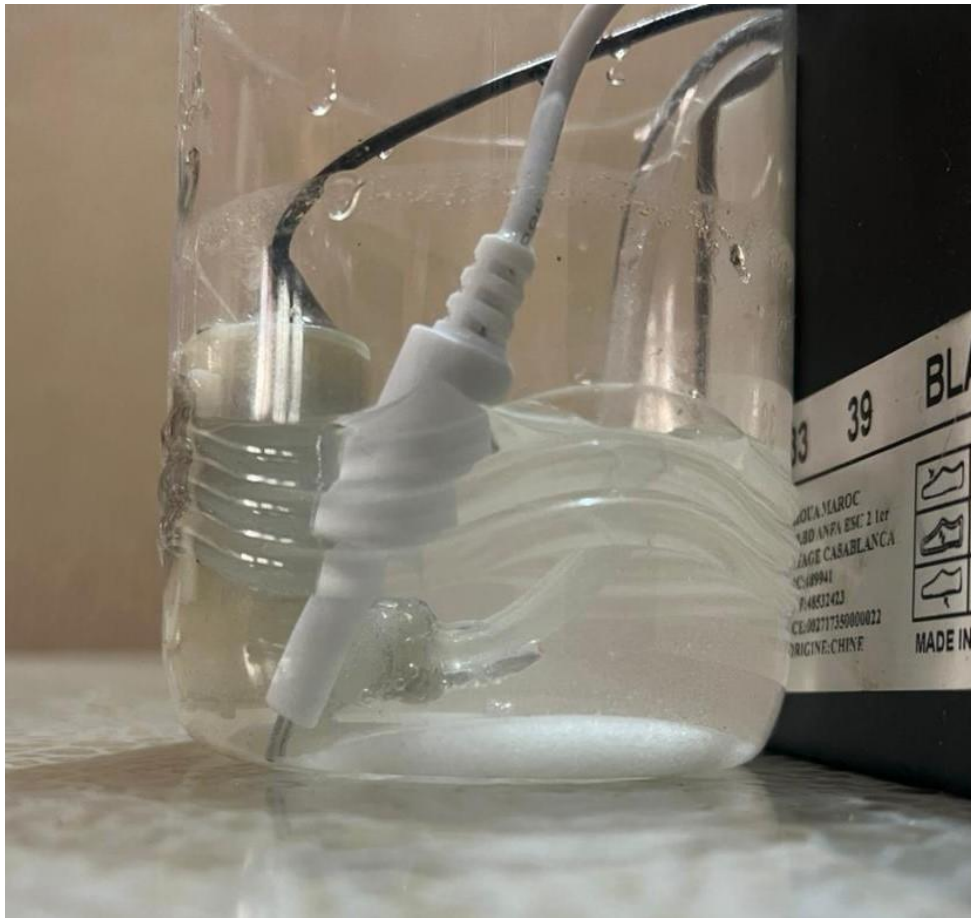
- Réalisation physique du prototype :



Img : 10

Réalisation d'une expérience :

- prototype : Tests & Résultats expérimentaux



Eau excédée en sel

Img : 11

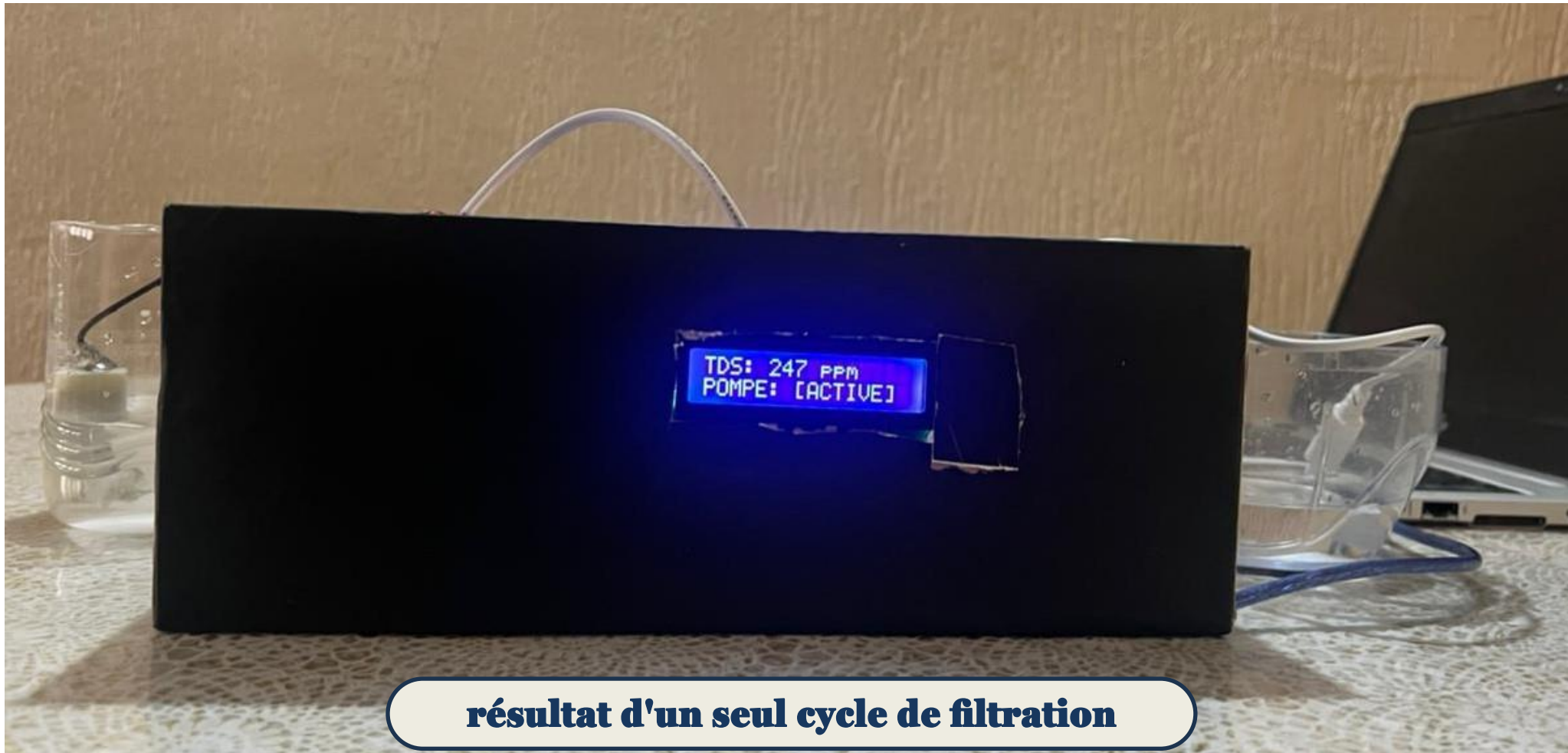


Activation du système

Img : 12

Réalisation d'une expérience :

- prototype : Tests & Résultats expérimentaux



résultat d'un seul cycle de filtration

Img : 13

Réalisation d'une expérience :

- prototype : Tests & Résultats expérimentaux

□ **Résultat final :**



En fin de compte, on peut constater que si on répète ce cycle à plusieurs reprises, on peut satisfaire notre exigence



ANNEXES



Test du Capteur TDS V1.0 :

AQUANOVAproteus.ino

```
1  // --- Test du Capteur TDS V1.0 ---
2
3  #define TDS_PIN A0
4
5  void setup() {
6      // Initialisation de la communication série à 9600 bauds
7      Serial.begin(9600);
8      Serial.println("Initialisation du test du capteur TDS...");
9      Serial.println("-----");
10 }
11
12 void loop() {
13     // 1. Lecture de la valeur analogique brute (entre 0 et 1023)
14     int rawValue = analogRead(TDS_PIN);
15
16     // 2. Conversion de cette valeur brute en tension électrique (Volts)
17     // L'Arduino Uno fonctionne avec une référence de 5V et un CAN 10 bits (1024 valeurs)
18     float voltage = rawValue * (5.0 / 1024.0);
19
20     // 3. Conversion de la tension en TDS (ppm)
21     // Utilisation de la formule polynomiale de compensation standard pour ce module
22     float tdsValue = (133.42 * pow(voltage, 3) - 255.86 * pow(voltage, 2) + 857.39 * voltage) * 0.5;
23
24     // 4. Affichage des données sur le Moniteur Série
25     Serial.print("Valeur brute: ");
26     Serial.print(rawValue);
27     Serial.print(" | Tension: ");
28     Serial.print(voltage, 2); // Affichage avec 2 décimales
29     Serial.print(" V | TDS: ");
30     Serial.print(tdsValue, 0); // Affichage sans décimales (entier)
31     Serial.println(" ppm");
32
33     // 5. Attente d'une seconde avant la prochaine lecture
34     delay(1000);
35 }
```

Code C++ du simulation proteus :

AQUANOVAproteus.ino

```
1  #include <LiquidCrystal.h>
2
3  // --- Câblage de l'écran LCD sur ISIS ---
4  // RS=12, Enable=11, D4=5, D5=4, D6=3, D7=2
5  LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
6
7  // --- Câblage des capteurs et actionneurs ---
8  const int pinTDS = A0; // Entrée Analogique du Potentiomètre (simulation TDS)
9  const int pinENA = 9; // Sortie PWM vers le L298N (Vitesse de la pompe)
10 const int pinIN1 = 8; // Direction moteur 1 (L298N)
11 const int pinIN2 = 7; // Direction moteur 2 (L298N)
12
13 // --- Paramètres du correcteur PI ---
14 float Kp = 2.5; // Gain Proportionnel
15 float Ti = 1.2; // Temps d'intégration
16 float Te = 0.1; // Période d'échantillonnage (100 ms)
17
18 // --- Variables globales de mémoire ---
19 float consigneTDS = 500.0; // Consigne cible de salinité en ppm
20 float u_k = 0.0; // Commande PWM actuelle (0 à 255)
21 float u_k_1 = 0.0; // Commande PWM précédente
22 float erreur_k = 0.0; // Erreur actuelle
23 float erreur_k_1 = 0.0; // Erreur précédente
24
25 void setup() {
26     // 1. Initialisation de l'écran LCD (16 colonnes, 2 lignes)
27     lcd.begin(16, 2);
28     lcd.print("Init TIPE...");
29
30     // 2. Initialisation des broches du moteur
31     pinMode(pinENA, OUTPUT);
32     pinMode(pinIN1, OUTPUT);
33     pinMode(pinIN2, OUTPUT);
34
35     // 3. Sens de rotation fixe pour la pompe
36     digitalWrite(pinIN1, HIGH);
37     digitalWrite(pinIN2, LOW);
38
39     // 4. Petit délai pour que l'écran s'initialise correctement sous ISIS
40     delay(1000);
41     lcd.clear();
42 }
```

```
42 }
43
44 void loop() {
45     // -----
46     // ÉTAPE 1 : LECTURE DU CAPTEUR TDS SIMULÉ
47     // -----
48     int valeurAnalogique = analogRead(pinTDS);
49     // Conversion de la tension (0-1023) en TDS (0-1000 ppm)
50     float tdsMeasure = map(valeurAnalogique, 0, 1023, 0, 1000);
51
52     // -----
53     // ÉTAPE 2 : LOGIQUE DE DÉCLENCHEMENT ET RÉGULATION
54     // -----
55     if (tdsMeasure > 150.0) {
56
57         // La salinité dépasse le seuil, la boucle PI s'active
58         erreur_k = consigneTDS - tdsMeasure;
59
60         // Calcul du correcteur PI (Méthode d'Euler)
61         float termeProportionnel = erreur_k - erreur_k_1;
62         float termeIntegral = (Te / Ti) * erreur_k;
63         u_k = u_k_1 + Kp * (termeProportionnel + termeIntegral);
64
65         // Saturation physique de la commande PWM (0 à 255 maximum)
66         if (u_k > 255.0) u_k = 255.0;
67         if (u_k < 0.0) u_k = 0.0;
68
69         // Mise à jour des mémoires pour le cycle suivant
70         erreur_k_1 = erreur_k;
71         u_k_1 = u_k;
72
73     } else {
74         // La salinité est inférieure à 150 ppm : l'eau est douce
75         u_k = 0.0; // Arrêt complet de la pompe
76
77         // Anti-Windup : On purge la mémoire du correcteur PI
78         erreur_k_1 = 0.0;
79         u_k_1 = 0.0;
80     }
81
82     // -----
83     // ÉTAPE 3 : APPLICATION DE LA PUISSANCE
```

```

67     if (u_k < 0.0) u_k = 0.0;
68
69     // Mise à jour des mémoires pour le cycle suivant
70     erreur_k_1 = erreur_k;
71     u_k_1 = u_k;
72
73 } else {
74     // La salinité est inférieure à 150 ppm : l'eau est douce
75     u_k = 0.0; // Arrêt complet de la pompe
76
77     // Anti-Windup : On purge la mémoire du correcteur PI
78     erreur_k_1 = 0.0;
79     u_k_1 = 0.0;
80 }
81
82 // -----
83 // ÉTAPE 3 : APPLICATION DE LA PUISSANCE
84 // -----
85 analogWrite(pinENA, (int)u_k);
86
87 // -----
88 // ÉTAPE 4 : AFFICHAGE SUR L'ÉCRAN LCD
89 // -----
90 // Affichage de la ligne 1 (Le TDS)
91 lcd.setCursor(0, 0);
92 lcd.print("TDS : ");
93 lcd.print((int)tdsMesure);
94 lcd.print(" ppm "); // Les espaces effacent les anciens caractères
95
96 // Affichage de la ligne 2 (État de la pompe - MODIFIÉ SELON VOTRE DEMANDE)
97 lcd.setCursor(0, 1);
98 if (tdsMesure > 150.0) {
99     | lcd.print("Pompe : ACTIVE "); // S'affiche si > 150
100 } else {
101     | lcd.print("Pompe : ARRET "); // S'affiche si <= 150
102 }
103
104 // -----
105 // ÉTAPE 5 : TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE
106 // -----
107 delay(100);
108 }

```

MERCI

