



**TRAVAUX D'INITIATIVE
PERSONNELLE ENCADRÉS**

T.I.P.E. 2026

Cycle / boucle

Sujet :



Natural Floor Cooling NFC :

Climatisation naturelle à travers le sol

Préparé par :

AMINE EL AOUNI

Encadré par :

- Pr A. OUAANABI
- Pr Y. RAHOU

1

Introduction

2

Présentation fonctionnelle

3

Modélisation et expérimentation du système

4

Communication du système avec l'utilisateur

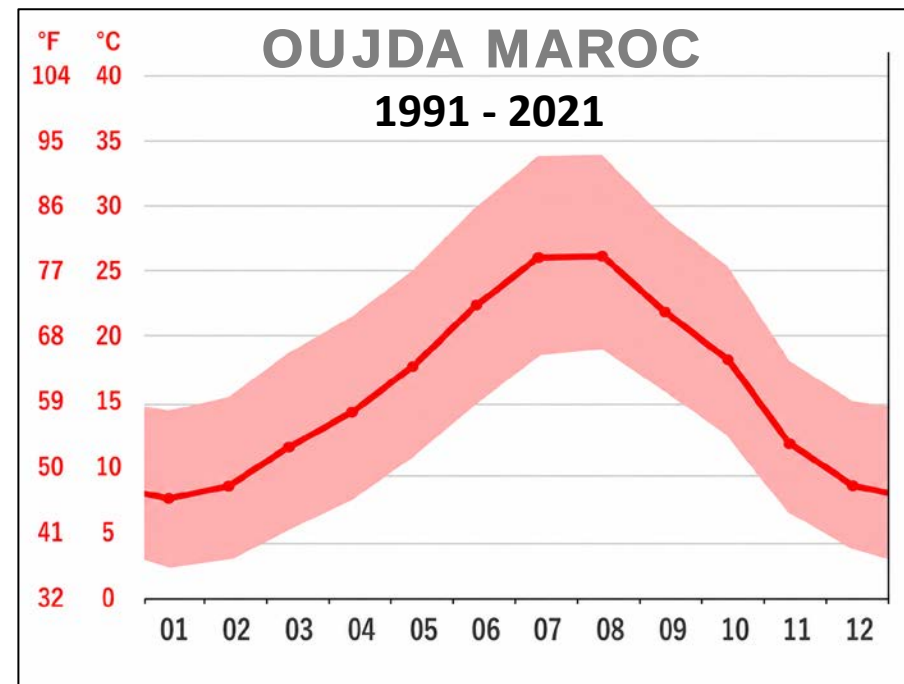
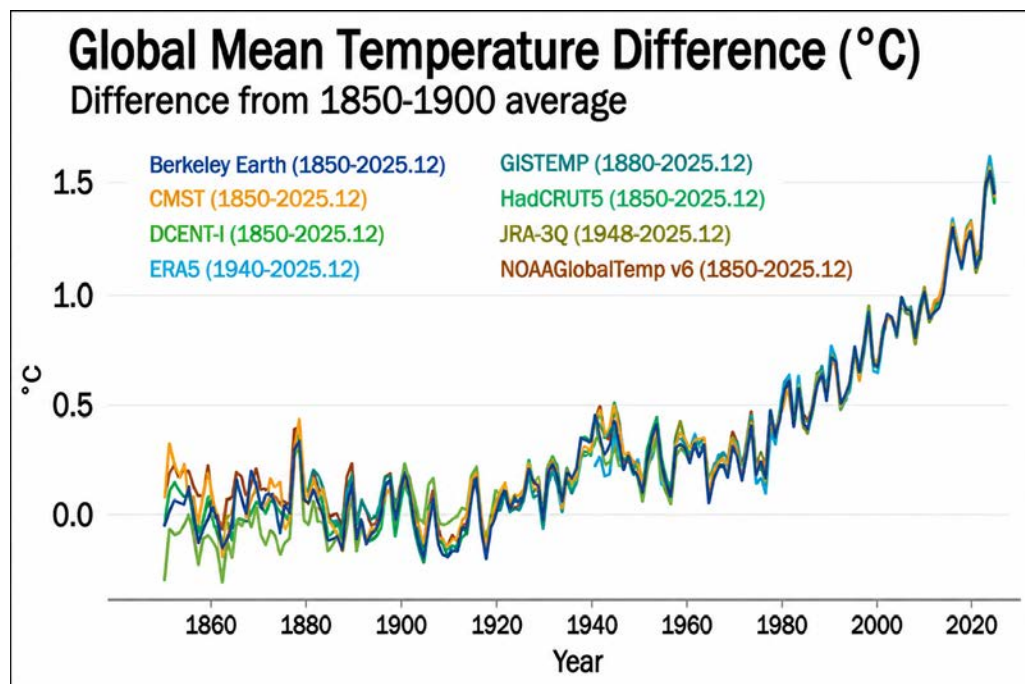
5

Estimation financière de prototype

6

Conclusion

□ Évolution de température dans le monde et OUJDA MAROC

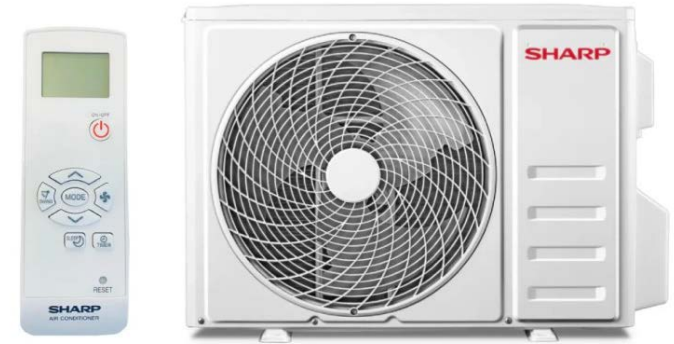


- o **Monde** : la température moyenne augmente fortement depuis 1900, avec une accélération nette après 1980 (le maximum en 2024 ⚠)
- o **Oujda** : la température moyenne devient élevée en été, surtout en juillet et août.

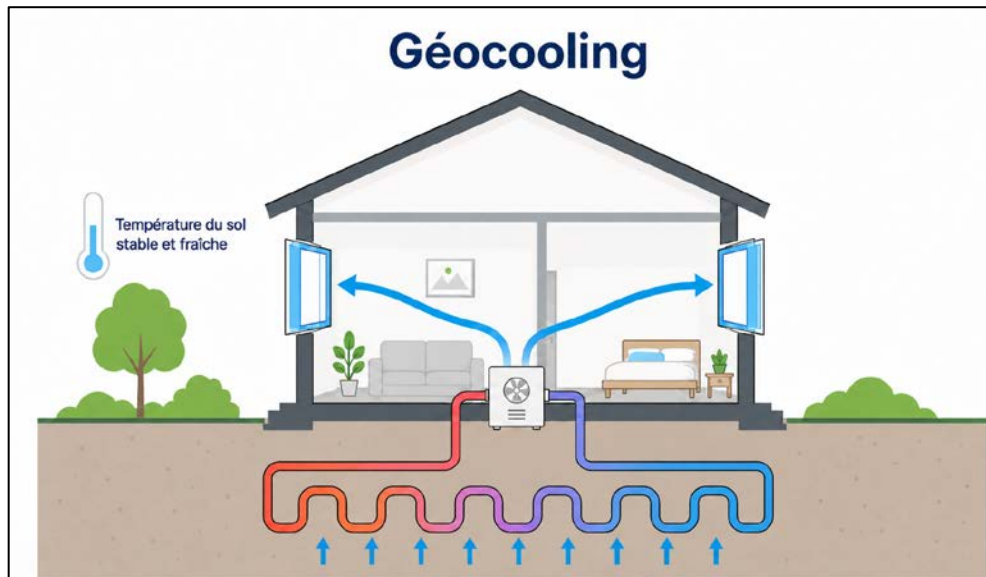
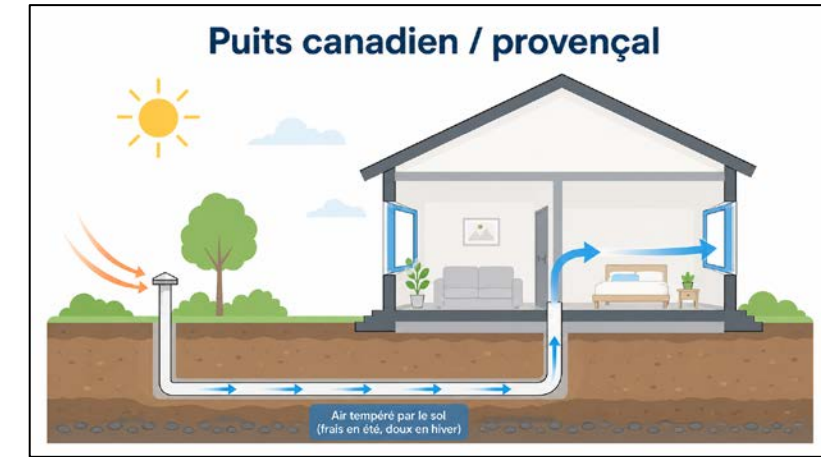
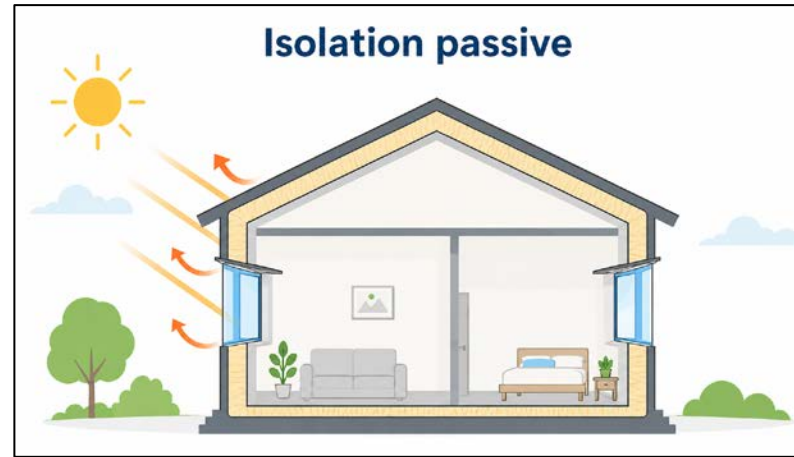
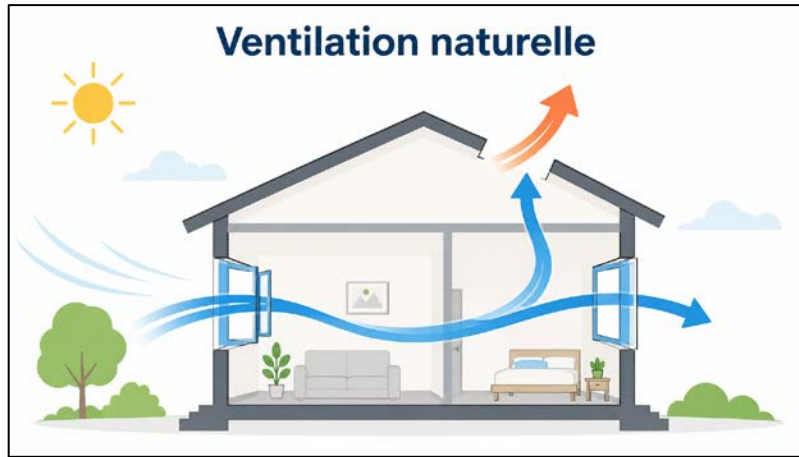
❑ Besoin en climatisation dans les jours chaudes

L'Agence internationale de l'énergie (iea):

- o La consommation électrique mondiale des bâtiments a augmenté de plus de **600 TWh** en **2024**.
- o Les bâtiments représentent environ **30 %** de la demande énergétique mondiale.
- o Le refroidissement des espaces devrait continuer à **augmenter** avec les **étés plus chauds**.
- o **Conclusion** : *Il devient donc nécessaire d'étudier des solutions plus sobres*



❑ Solutions alternatives pour le refroidissement



L'idée de TIPE : circuler l'air extérieur dans des tuyaux enterrés à une certaine profondeur. Le sol ayant une température plus stable que l'air extérieur, il peut rafraîchir l'air en été avant son introduction dans le local afin de refroidir les espaces

❑ Problématique :

Comment concevoir et intégrer un système de climatisation naturelle par échange thermique avec le sol, afin d'améliorer le confort thermique d'une maison tout en réduisant sa consommation énergétique et son impact environnemental ?

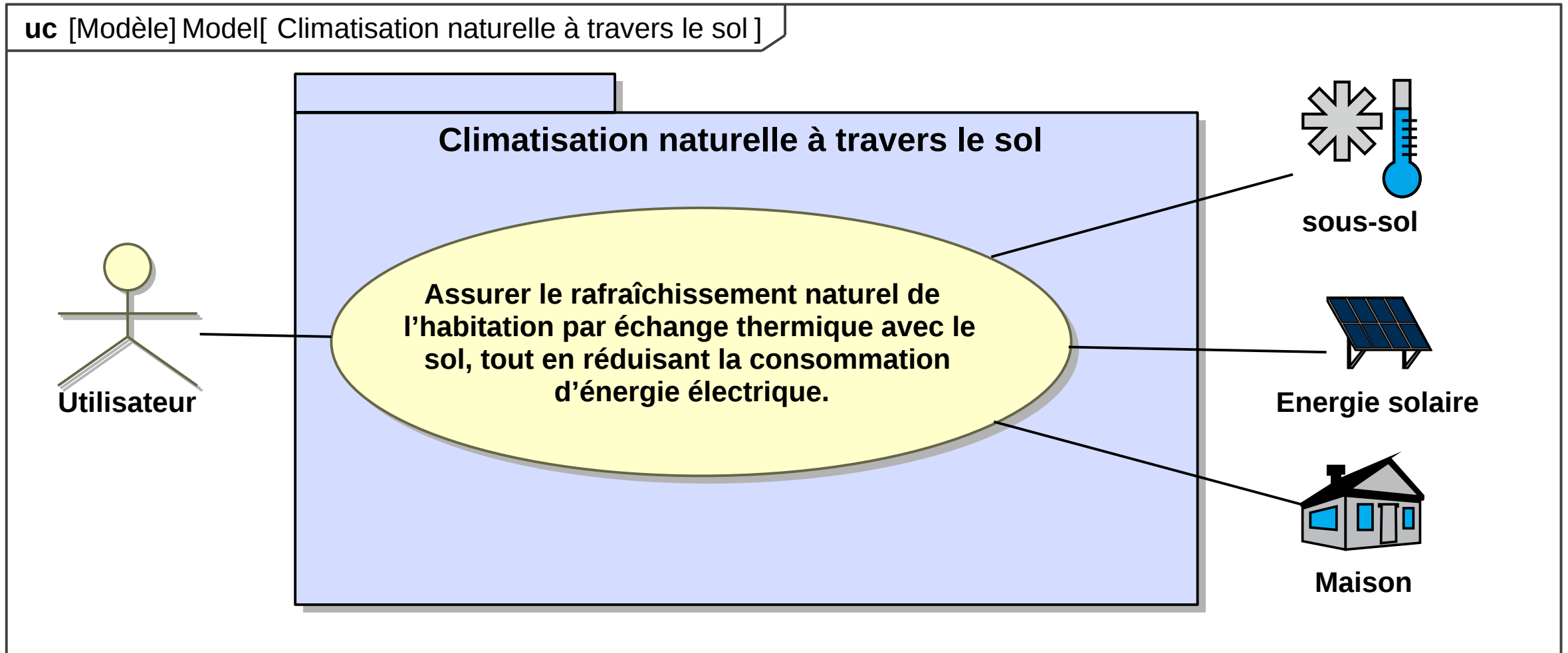


❑ Objectifs :

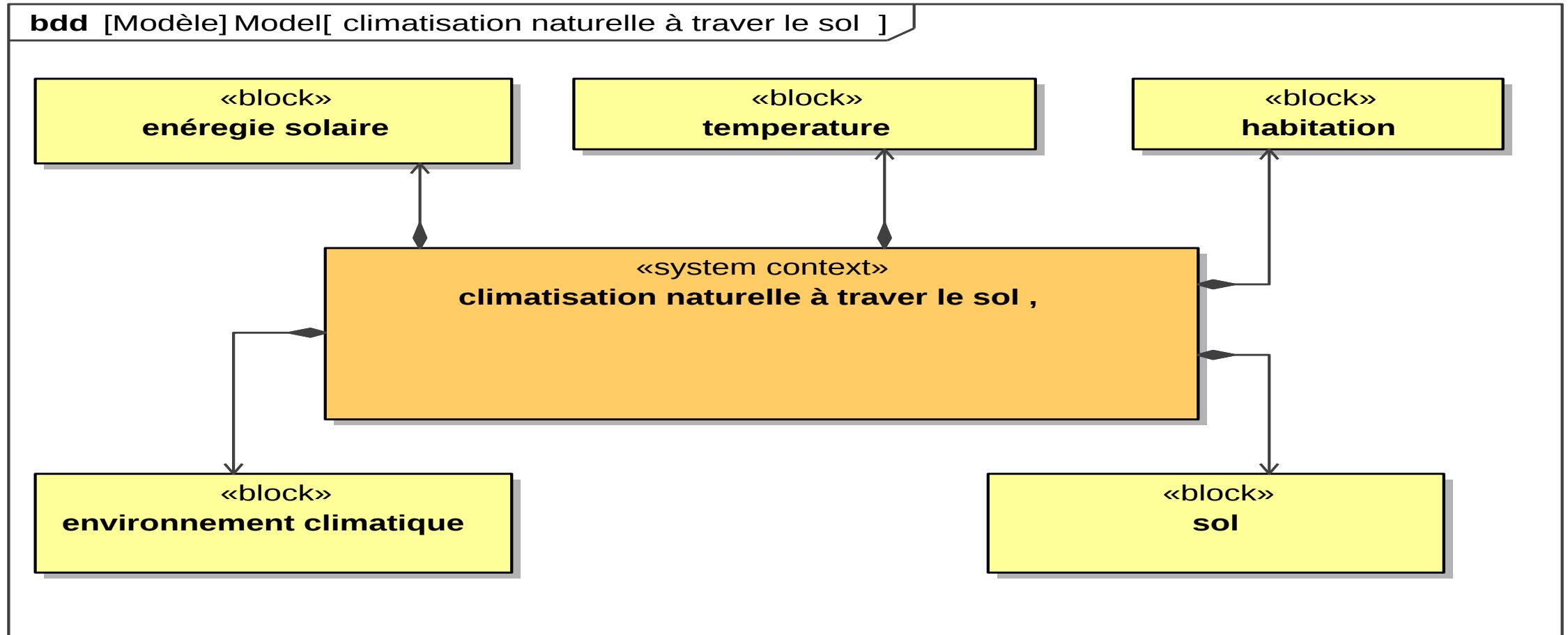
- ✓ Mesurer la température du sol à différentes profondeurs et analyser l'influence de l'arrosage sur son comportement thermique.
- ✓ Analyser l'échange thermique entre l'air extérieur et un conduit enterré.
- ✓ Alimenter le système par une source solaire photovoltaïque.
- ✓ Réaliser et tester un prototype de climatisation naturelle par le sol.



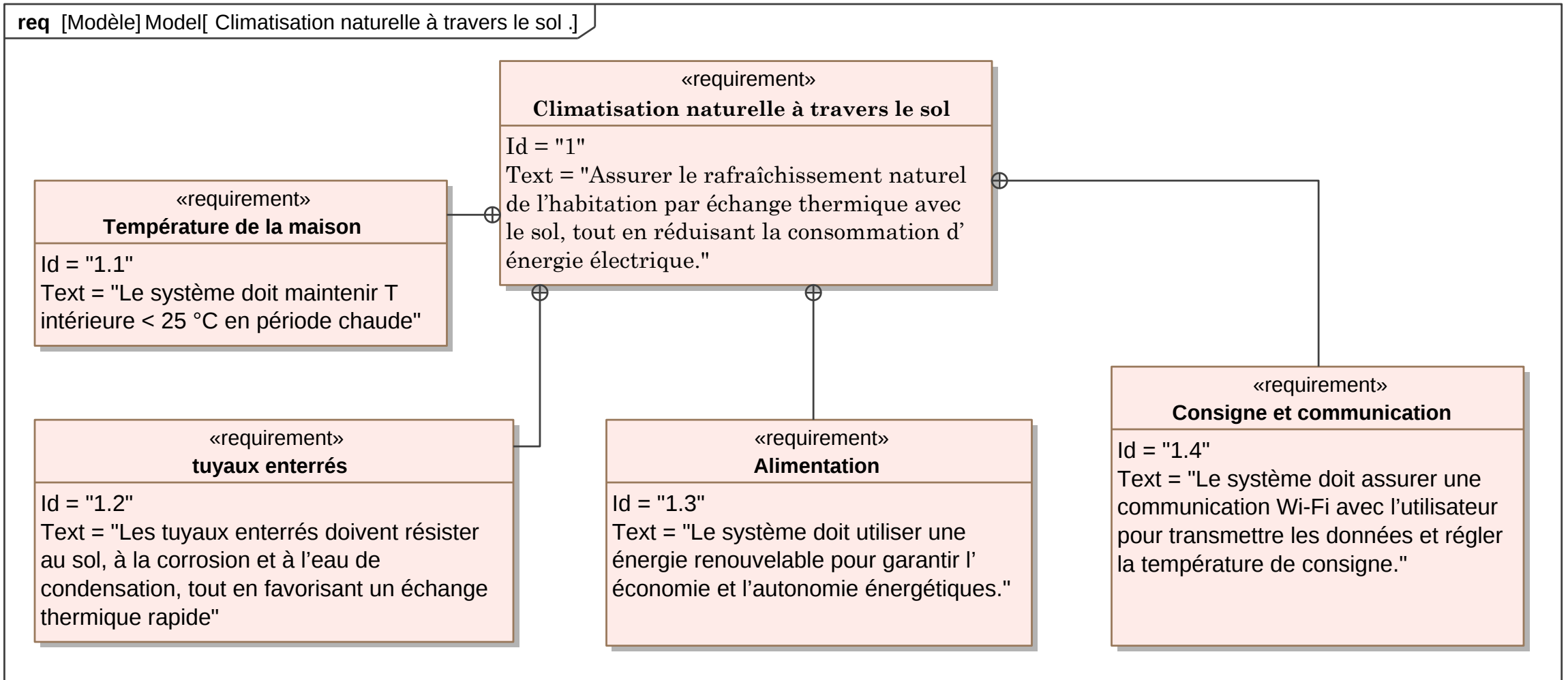
❑ Diagramme de cas d'utilisation « uc » :



❑ Diagramme d'exigence « req » :



❑ Diagramme d'exigence « req » :



1- Température de sol

Des chercheurs ont montré que la température du sol devient plus stable avec la profondeur, et sa valeur exacte dépend du climat local, de la profondeur, de l'humidité et de la nature du sol.

🔥 **Kalogirou et al** : À partir d'environ 1 à 2 m, les variations journalières deviennent faibles [1].

🔥 **Kusuda et Achenbach** : En été, le sol peut être considéré comme une source froide relative stable [2]

🔥 **Cherif Lekhal et al** : Indiquent qu'à 2 m de profondeur, la température annuelle du sol peut varier approximativement entre 13 °C et 26,8 °C, donc elle peut être inférieure à 25 °C pendant une grande partie de l'année [3].

2- Expérimentation : mesure la température de sol

2.1 - Choix de capteur

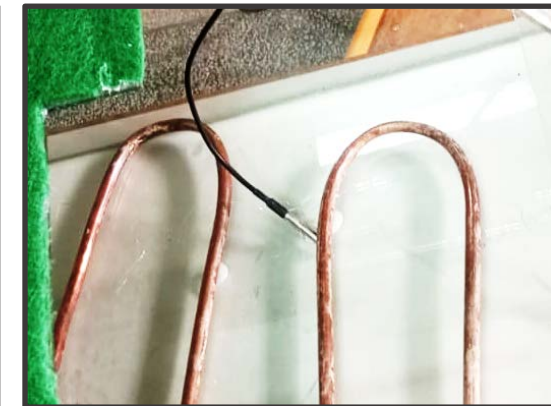


Le capteur **DS18B20** choisi permet de mesurer la température du sol :

- ✓ facile à intégrer avec une carte pédagogique.
- ✓ économique et adapté aux milieux humides.
- ✓ précision est suffisante pour suivre l'évolution de la température.

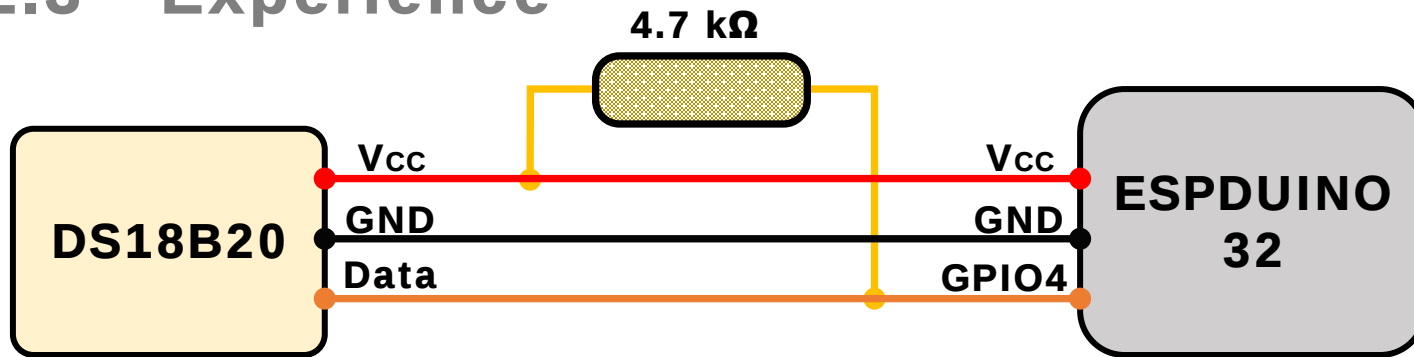
2.2 – Caractéristique du capteur

- o **Plage de mesure** : de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- o **Précision** : environ $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- o **Sortie numérique** : communication par bus 1-Wire.
- o **Étanchéité** : sonde en acier inoxydable.



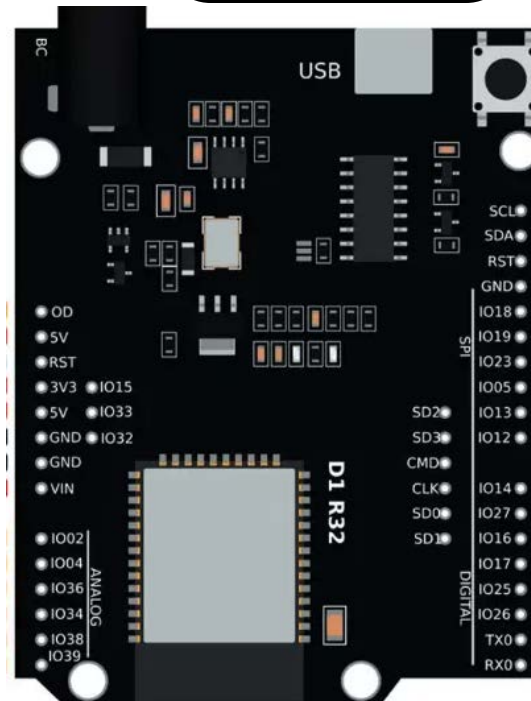
2- Expérimentation : mesure la température de sol

2.3 – Expérience



Résultats : 14/04/2026 à 11h

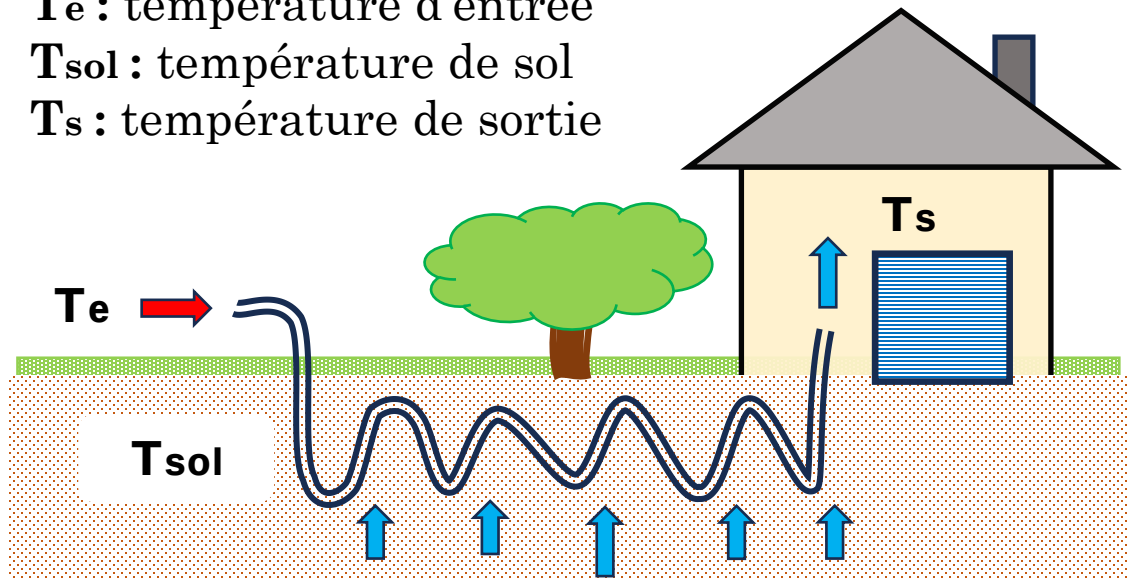
Profondeur	Température
0 cm	24.79
10 cm	24.65
20 cm	24.61
30 cm	23.89
'40 cm	23.24
50 cm	23.20



2- Modélisation thermique du système

□ Principe du modèle thermique

- T_e : température d'entrée
- T_{sol} : température de sol
- T_s : température de sortie



Hypothèses :

- Sol est une source froide à température constante
- écoulement de l'air est supposé permanent à l'entrée
- Le tuyau est en cuivre (grande conductivité thermique)

□ Données des grandeur

Grandeur	Symbole
Température d'entrée de l'air chaud (été à OUJDA)	$T_e = 35^\circ\text{C}$
Température du sol	$T_{sol} = 22^\circ\text{C}$
Longueur totale du tube	$L = 20\text{ m}$
Diamètre intérieur du tube	$D_i = 0,006\text{ m}$
Épaisseur du cuivre	$e = 0,001\text{ m}$
Vitesse de l'air	$V = 2\text{ m/s}$
Masse volumique de l'air	$\rho = 1.2\text{ Kg/m}^3$
Capacité thermique massique de l'air	$C_p = 1005\text{ J/kg.K}$
Conductivité thermique du cuivre	$\lambda_{\text{cuivre}} = 400\text{ W/m.K}$
Conductivité thermique du sol	$\lambda_{sol} = 1.5\text{ W/m.K}$
Coefficient convection air/cuivre	$h_{air} = 12\text{ W/m}^2.\text{K}$
Épaisseur équivalente du sol autour du tuyau	$e_{sol} = 0.006\text{ m}$

2- Modélisation thermique du système

□ Bilan thermique

Le modèle repose sur la conservation de l'énergie et la loi de refroidissement de Newton

Bilan sur un élément dx

L'air perd de la chaleur vers le sol.

Le flux échangé est proportionnel à l'écart $T_{air} - T_{sol}$.

Le périmètre d'échange du tuyau est

$$P = \pi D i.$$

Remarque importante

Ce n'est pas un théorème indépendant.

C'est l'application de la loi de Newton du refroidissement + conservation de l'énergie.

○ Bilan énergétique élémentaire :

$$\dot{m} c_p dT = -U.P.(T_e - T_{sol}) dx$$

○ Équation différentielle :

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{U P}{\dot{m} c_p} (T_e - T_{sol})$$

○ Solution du modèle :

$$T(x) = T_{sol} + (T_e - T_{sol}) \exp\left(-\frac{U.P.x}{\dot{m}.c_p}\right)$$

$$\text{Avec : } T_s = T(L) \quad ; \quad \text{Gain} = T_e - T_s$$

2- Modélisation thermique du système

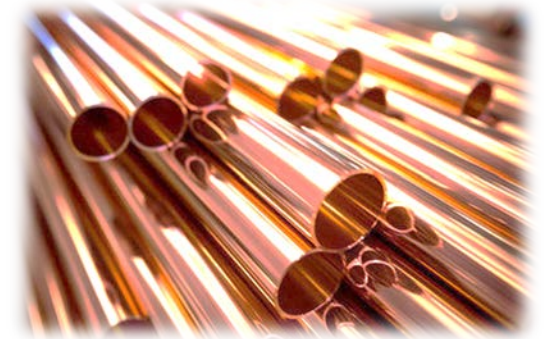
□ Influence du tuyau en cuivre

Résistances thermiques :

Convection air $\rightarrow$ paroi interne

Conduction dans la paroi en cuivre

Conduction équivalente dans le sol autour du tuyau



○ Résistance thermique globale :

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{conv-int}} + R_{\text{cond-cuivre}} + R_{\text{sol}}$$

○ Paroi en cuivre :

$$R_{\text{cond-cuivre}} = \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{\text{cuivre}} \cdot L}$$

Évolution temporelle :

$T(t)$ avec $x = v \cdot t$

Temps de passage : $t_{\text{passage}} = L/v$

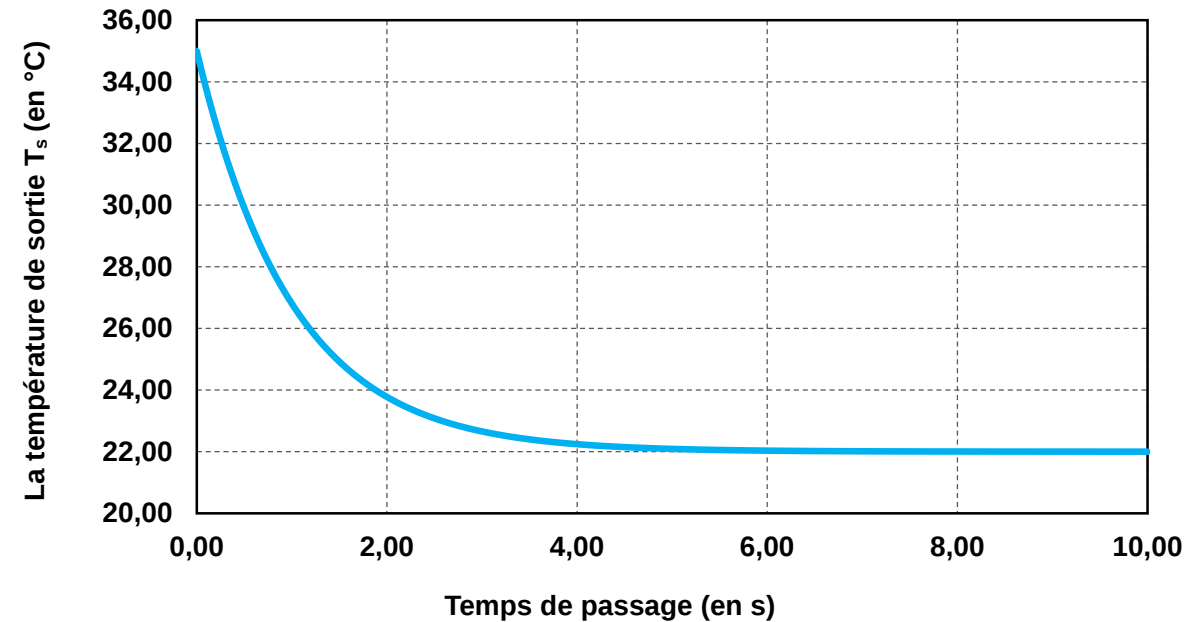
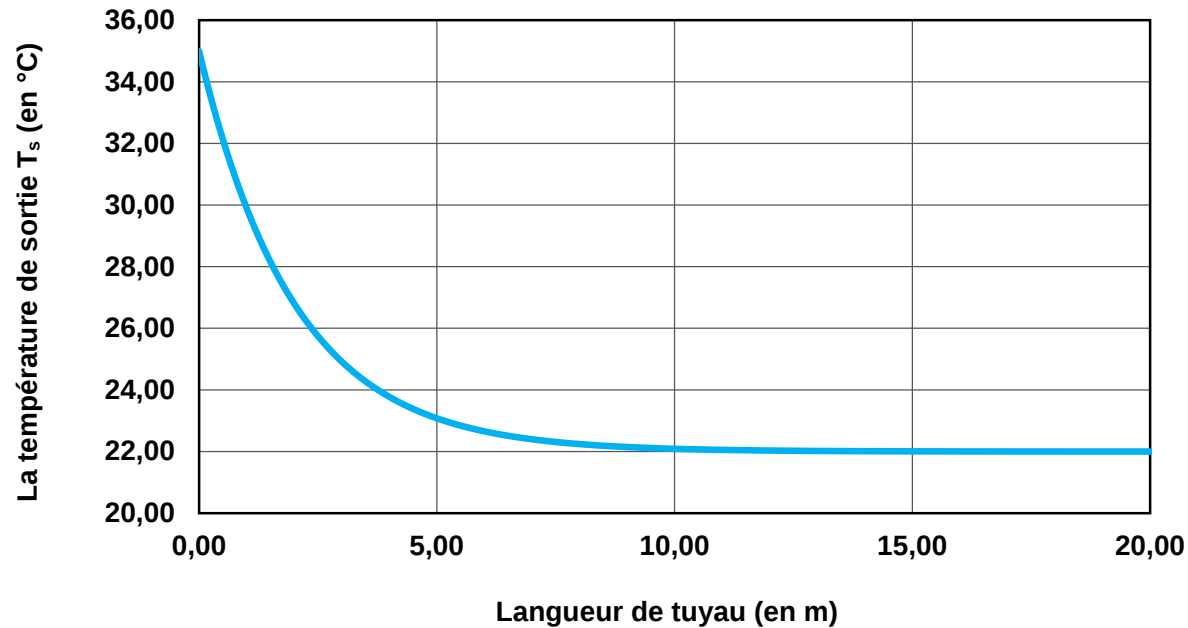
Comparaison de plusieurs longueurs ou débits

○ Évolution temporelle :

$$T(t) = T_{\text{sol}} + (T_e - T_{\text{sol}}) \exp\left(-\frac{U.P.v.t}{\dot{m} \cdot c_p}\right)$$

2- Modélisation thermique du système

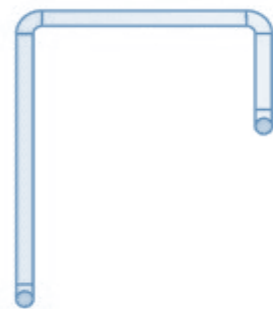
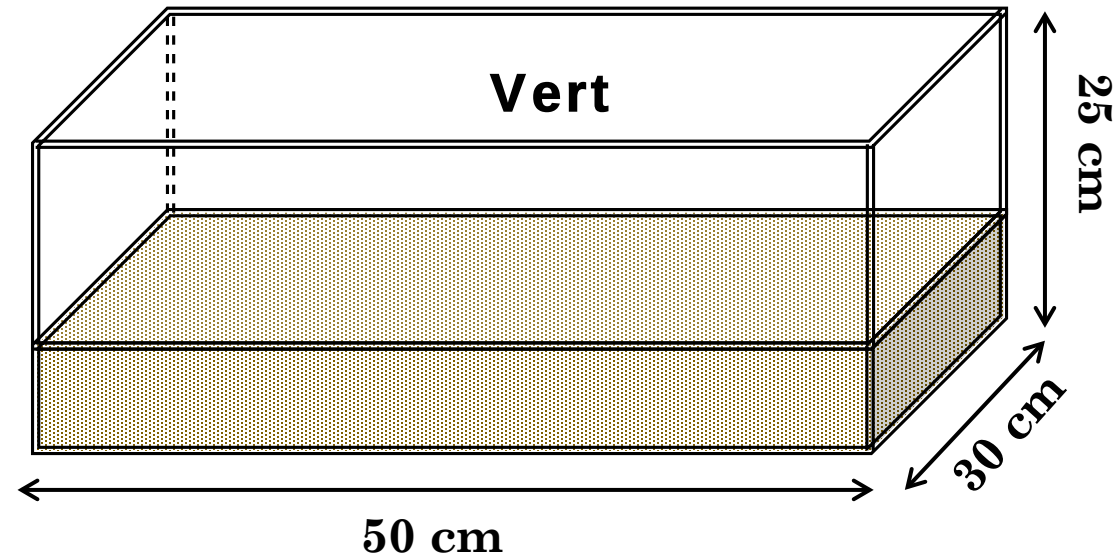
❑ Résultat de simulation



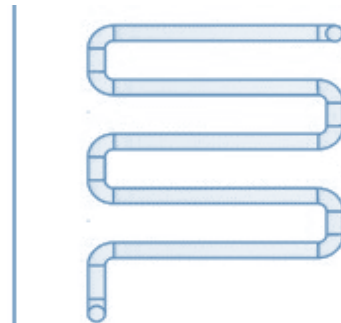
- o Pour assurer un refroidissement efficace de l'air, il faut augmenter la surface de contact entre l'air chaud et le sol froid.
- o Cette surface de contact augmente avec la longueur du tuyau L , ce qui permet de récupérer au maximum l'effet thermique du sol à la sortie.

3- Construction de prototype

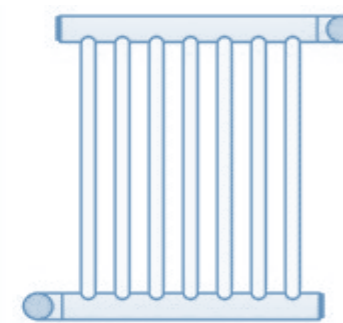
□ Dimension de prototype



Linéaire

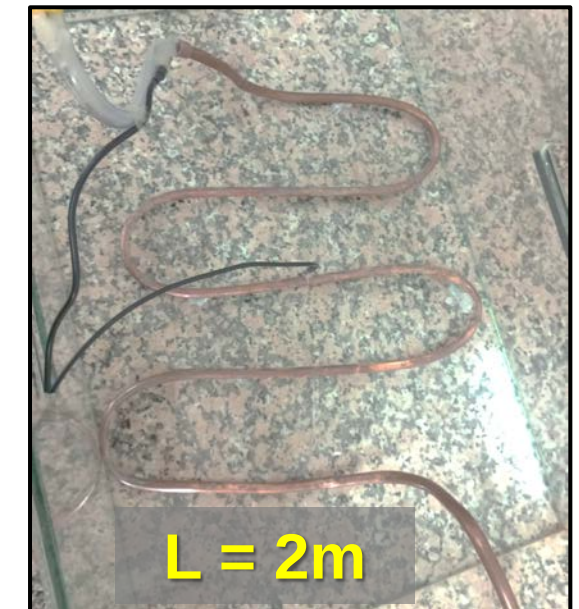
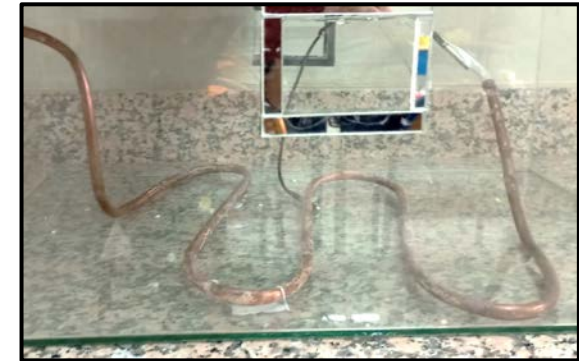


Méandres



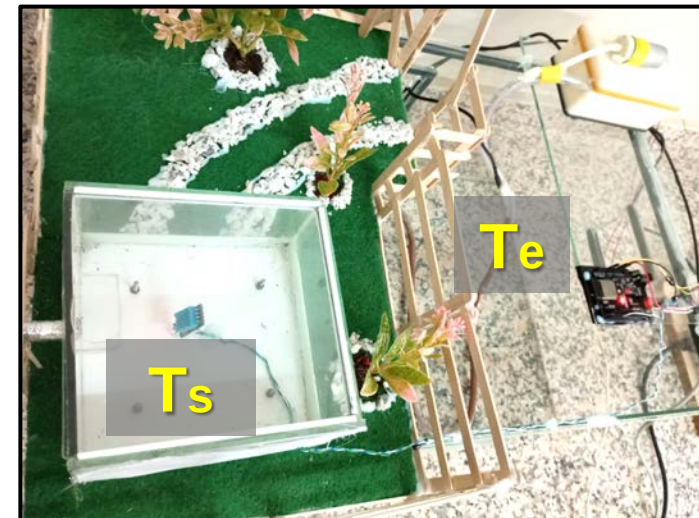
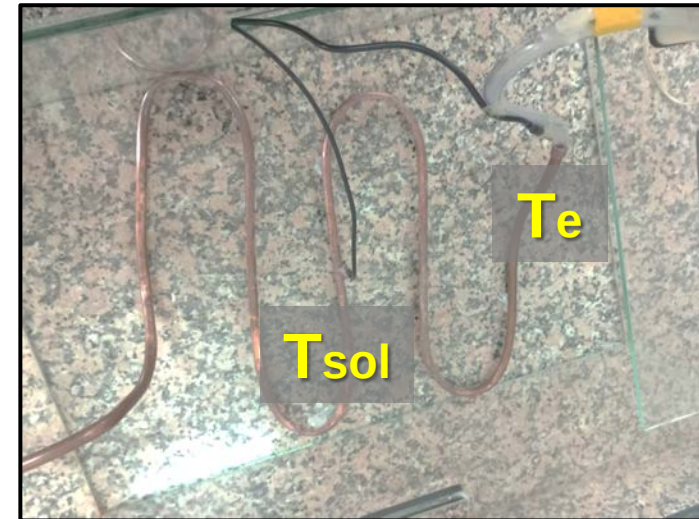
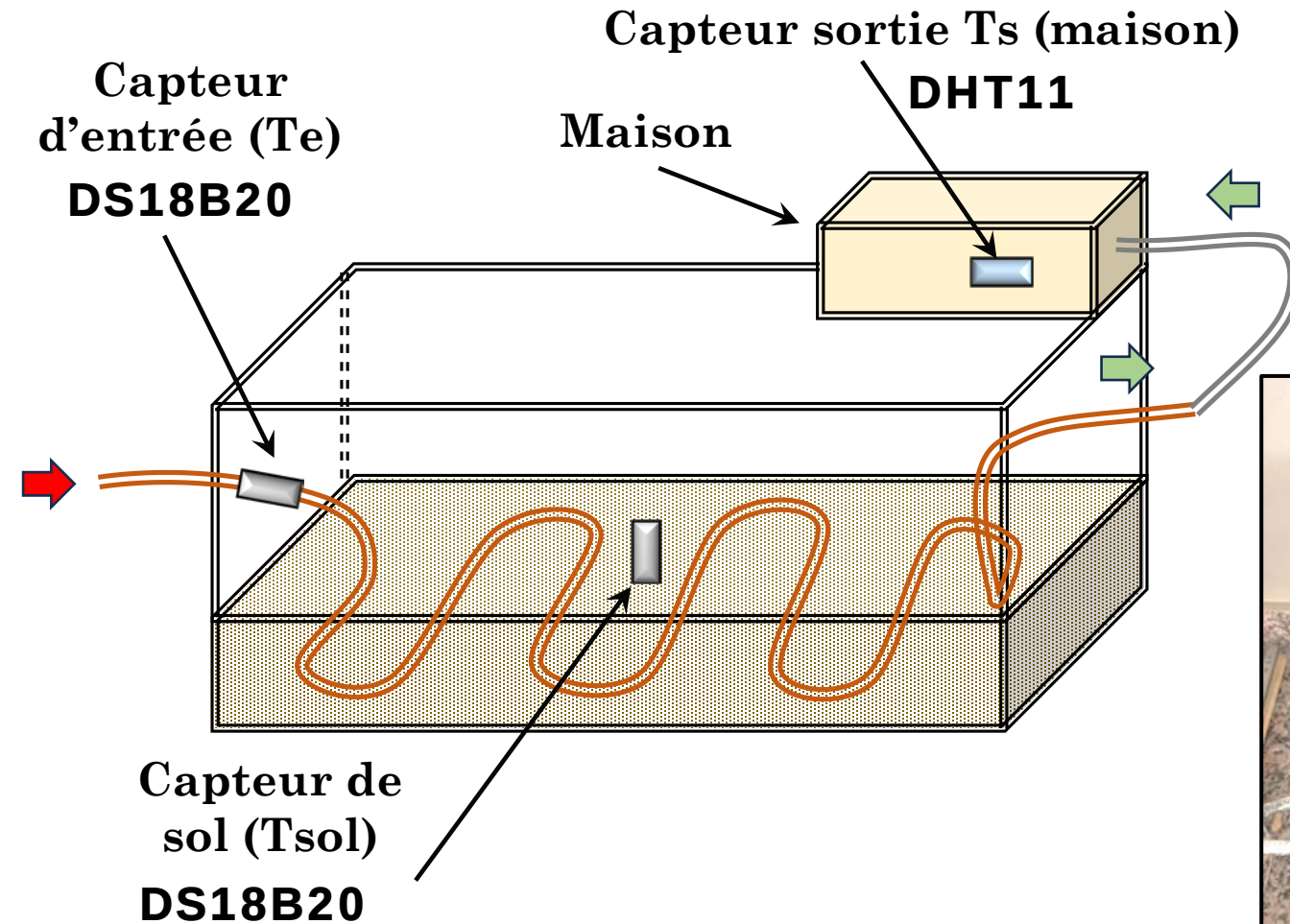
Rangées

Choix : Méandres



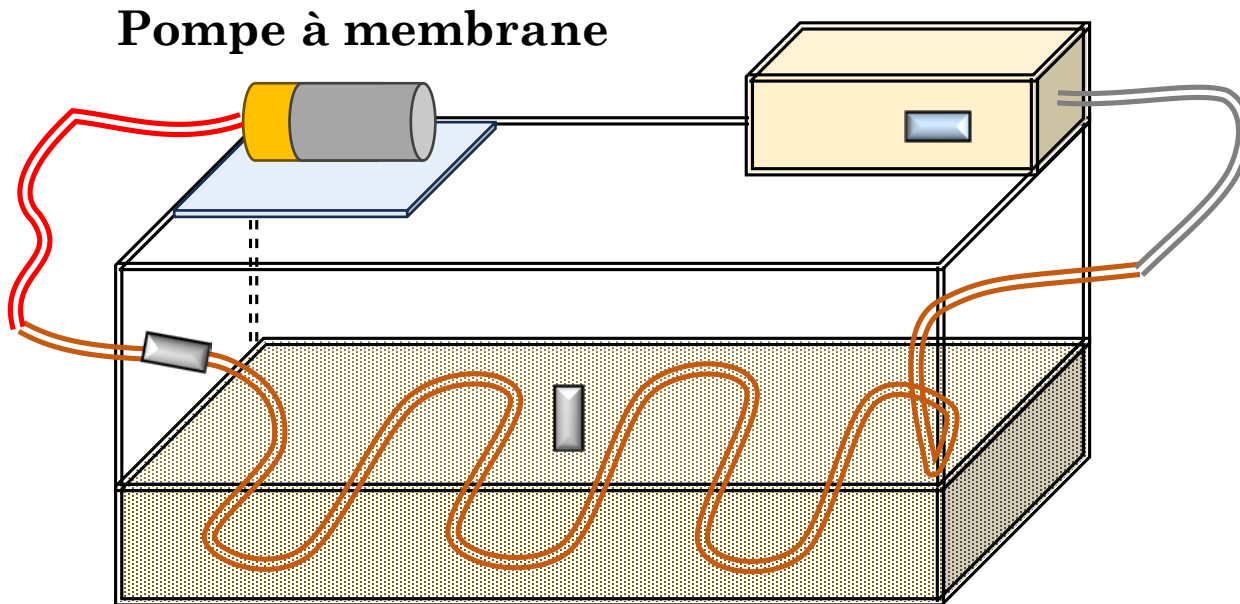
3- Construction de prototype

❑ Installation des capteurs de température



3- Construction de prototype

❑ Installation de ventilation à l'entrée



- o Plage de tension : 3V-5V
- o Plage de pression : 50KPa-80KPa
- o Débit d'air : 1.5-2.4 L/min
- o Bruit : < 60dB



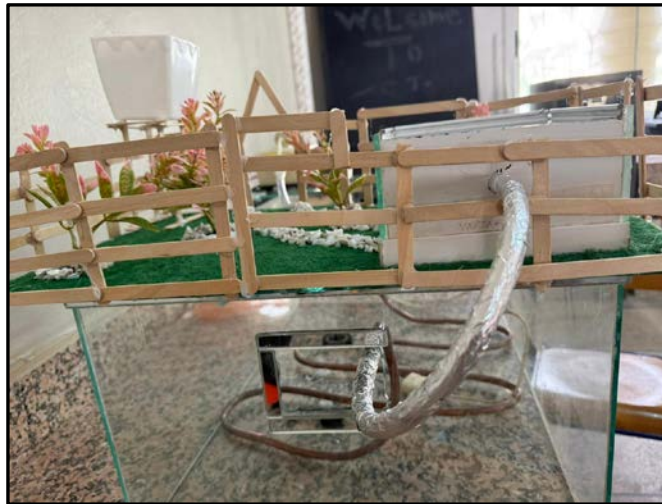
La vitesse d'air : $v = \frac{Q}{S}$ avec : $S = \frac{\pi D^2}{4}$

Or : $Q = 2.4 \text{ L/min}$ – $D = 5 \text{ mm}$

La vitesse maximal d'air : $v = 2 \text{ m/s}$

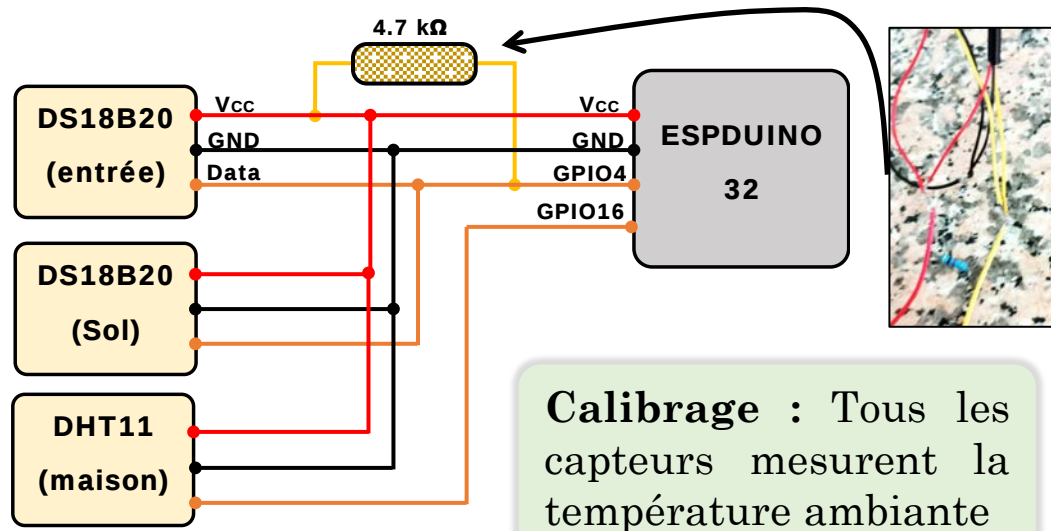
3- Construction de prototype

❑ Prototype final



4- Mesure le gain de refroidissement

❑ schéma de câblage



Calibrage : Tous les capteurs mesurent la température ambiante

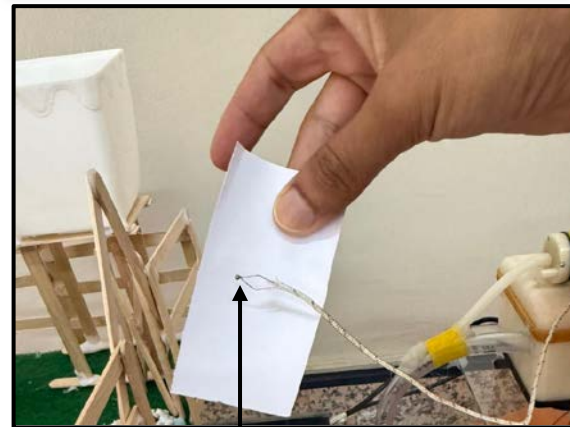
❑ Détection d'adressage

Sortie Moniteur série X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM7')

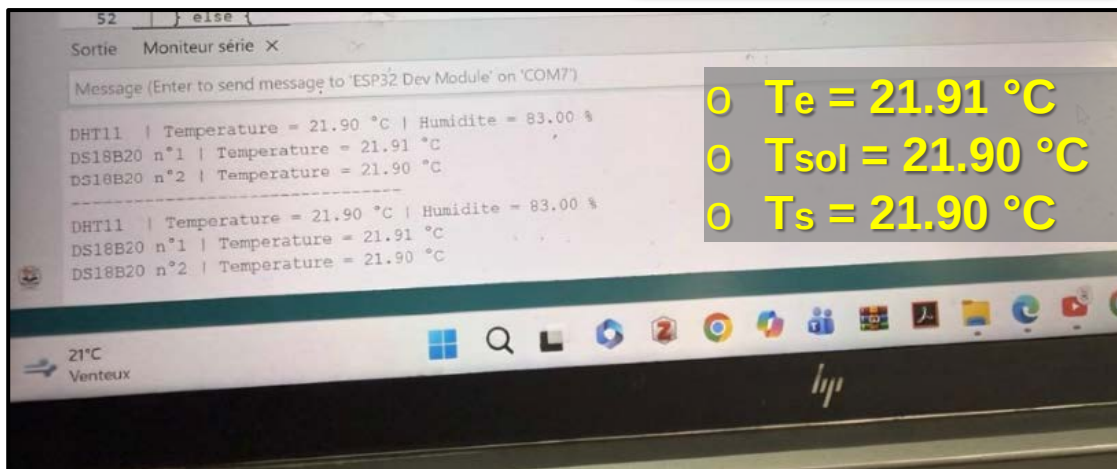
```
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40080400,len:3480
entry 0x400805b4
Recherche des capteurs DS18B20...
Nombre de capteurs detectes : 2
Adresse du capteur 0 : { 0x28, 0x94, 0x3A, 0x46, 0xD4, 0xCD, 0x1C, 0x27 }
Adresse du capteur 1 : { 0x28, 0x81, 0x2C, 0xCC, 0x00, 0x00, 0x00, 0x31 }
```

❑ Calibrage



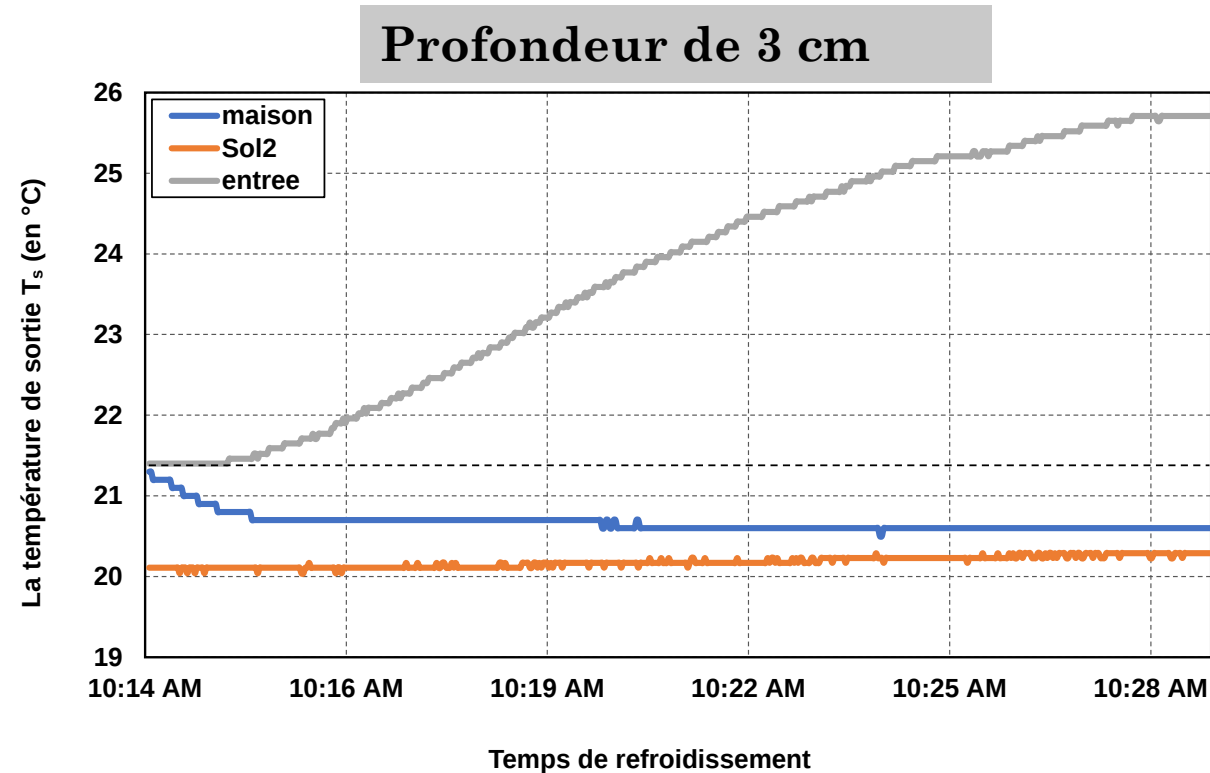
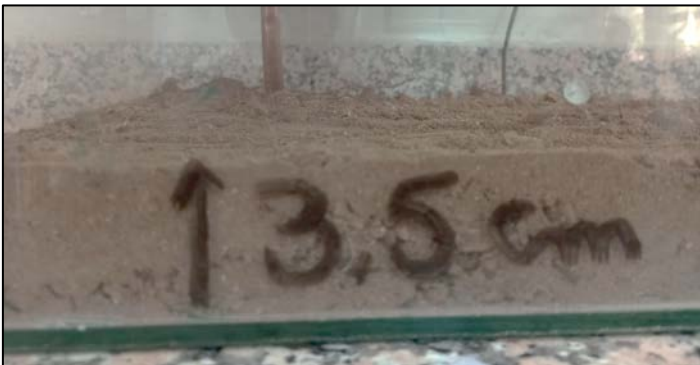
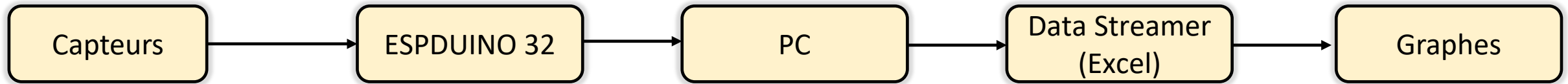
Thermomètre

Multimètre numérique



4- Mesure le gain de refroidissement

❑ Expérience 1 : Effet profondeur sur la température



$T_{sol} = 20.3^{\circ}\text{C}$

$T_e = 21.5^{\circ}\text{C}$

$T_s = 20.45^{\circ}\text{C}$

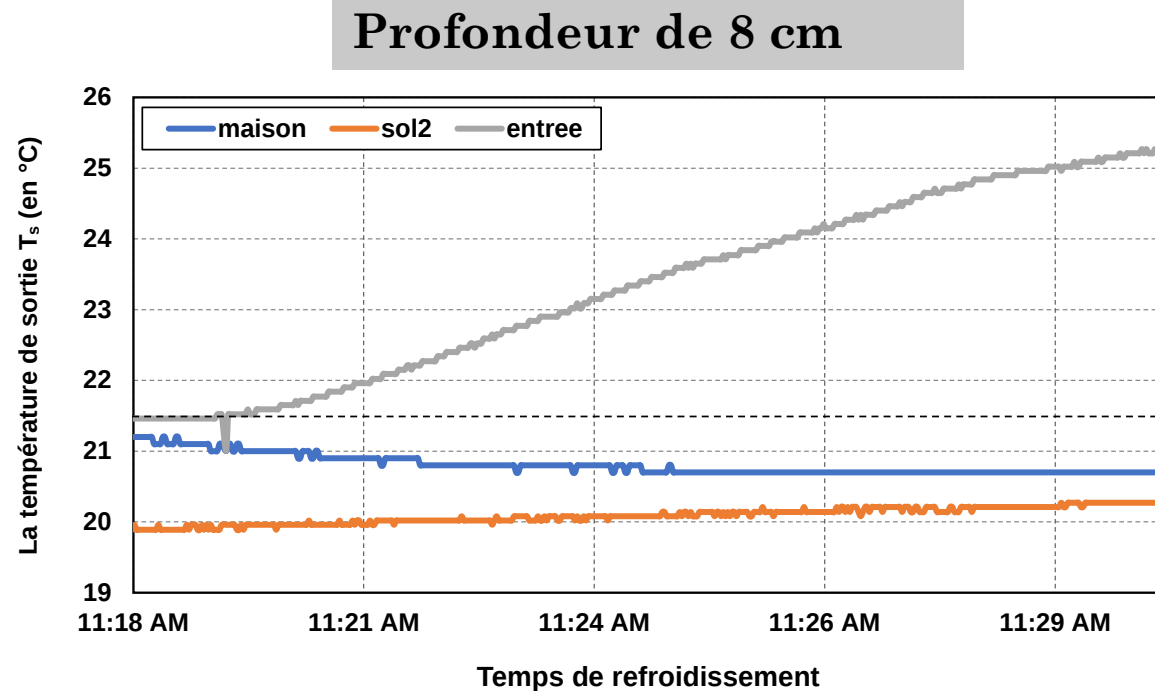
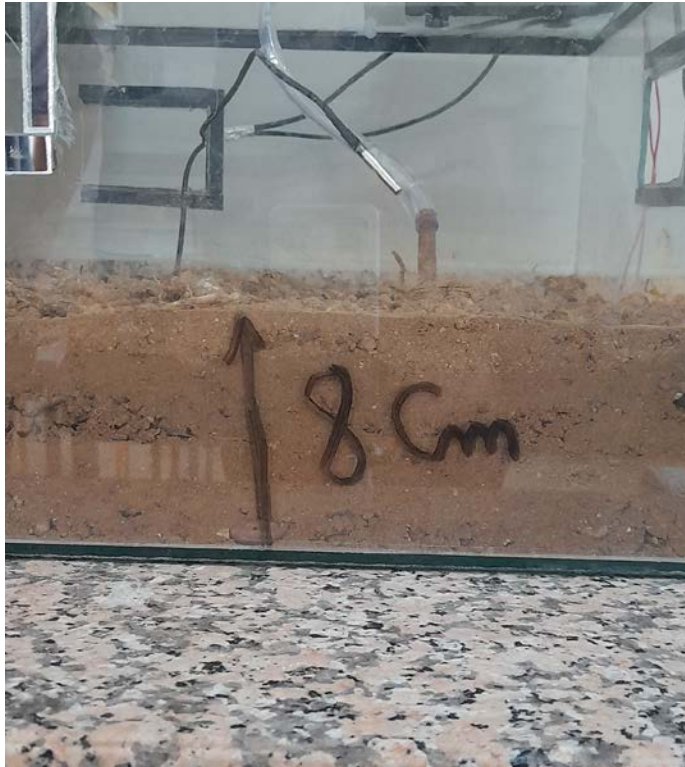
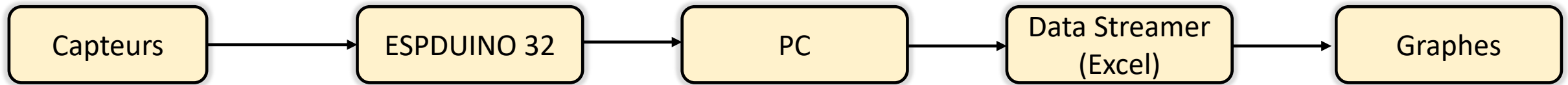


le gain de refroidissement

$\Delta T = 1.05^{\circ}\text{C}$

4- Mesure le gain de refroidissement

❑ Expérience 1 : Effet profondeur sur la température



$T_{sol} = 20.35^{\circ}\text{C}$

$T_e = 21.61^{\circ}\text{C}$

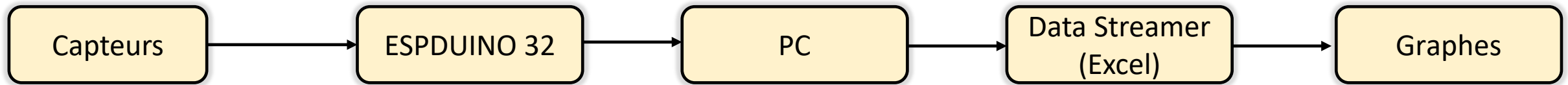
$T_s = 20.6^{\circ}\text{C}$

↓
le gain de
refroidissement

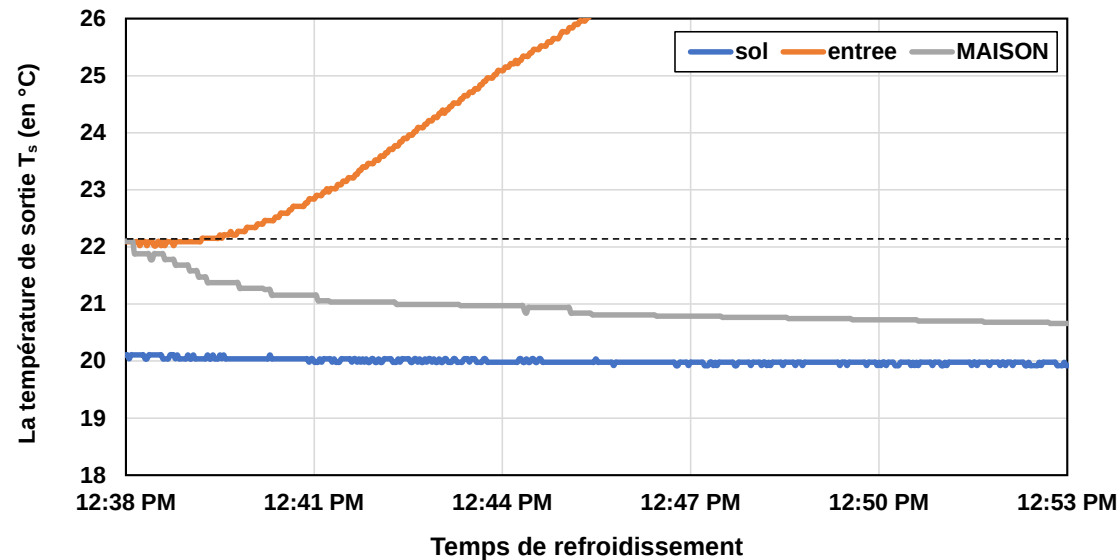
$\Delta T = 1.01^{\circ}\text{C}$

4- Mesure le gain de refroidissement

❑ Expérience 2 : Effet D'humidité de sol sur la température



Profondeur de 3 cm + Humidié de sol



$T_{sol} = 20,05^{\circ}\text{C}$

$T_e = 22.10^{\circ}\text{C}$

$T_s = 20.64^{\circ}\text{C}$



le gain de
refroidissement

$\Delta T = 1.46^{\circ}\text{C}$

4- Mesure le gain de refroidissement

❑ Interprétations

- ✓ Le tuyau enterré permet un refroidissement naturel de l'air.
- ✓ Le gain mesuré est d'environ 1 °C à 1,5 °C.
- ✓ Le sol humide améliore le refroidissement grâce à un meilleur échange thermique.
- ✓ L'effet de profondeur entre 3 cm et 8 cm reste limité.
- ✓ La hausse de la température d'entrée vient surtout de l'échauffement de la pompe.



5- Optimisation de l'énergie électrique

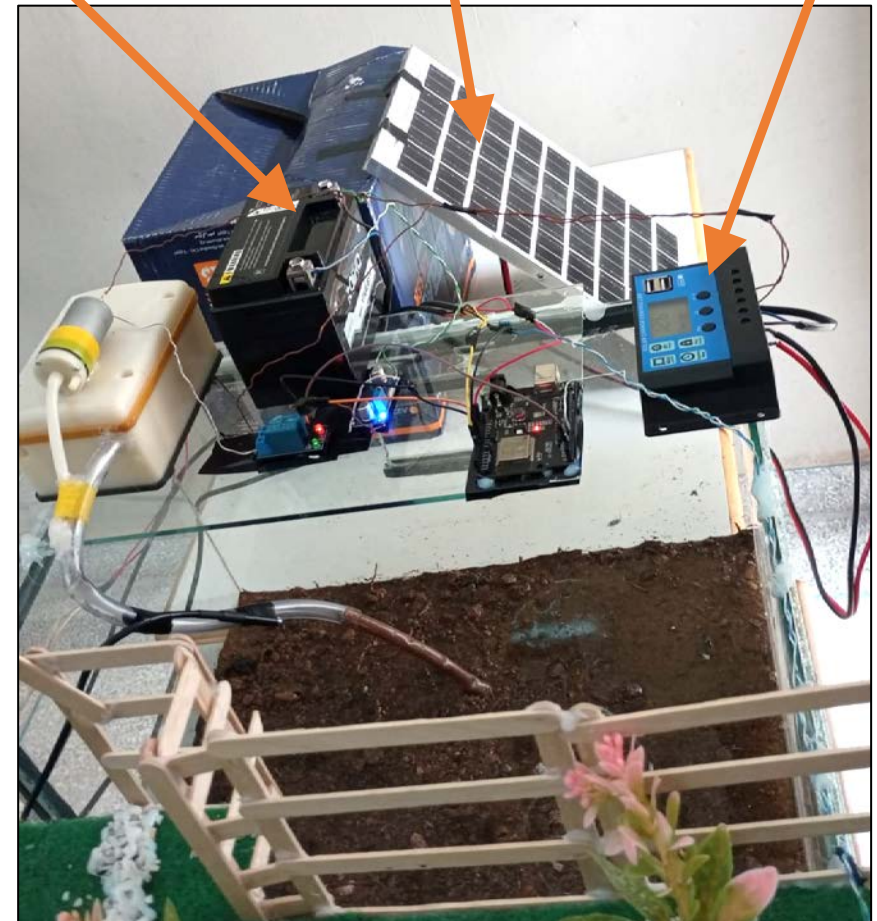
❑ Objectif

- ✓ Assurer une indépendance énergétique.
- ✓ Refroidissement gratuite
- ✓ Assurer une autonomie de système
- ✓ Favoriser des énergies renouvelables

❑ Données

Elément	Grandeurs
Pompe	5V, 0.35A
ESPDUINO	1W
Convertisseur	(12V vers 5V) : $\eta = 0.85$
Durée de fonctionnement	8h/jour
Durée d'ensoleillement	4h/jour

Batterie (Pb) Panneau solaire PV Régulateur MPPT



5- Optimisation de l'énergie électrique

□ Puissance consommée

Charges	Expression	Valeur
Pompe	$P_p = U.I$	1.75 W
ESPduino	P_E	1 w
Puissance utile	$P_u = P_p + P_E$	2,75 W

Avec les pertes du convertisseur DC-DC, on prend un rendement : **0.85** $\Rightarrow P_T = \frac{P_u}{\eta} \Rightarrow P_T \approx 3,2W$

□ Choix de la batterie

Si le prototype fonctionne environ : $\Delta t = 8h$

L'énergie nécessaire est donc : $E = P_{totale} \times t$

donc : **E = 25 Wh**

Pour une batterie de tension : $U_b = 12V$

La capacité nécessaire est : $C = \frac{E}{U_b} \Rightarrow C \approx 2,13Ah$

□ Choix de PV

L'énergie à fournir par jour est environ :

$$E_{\text{jour}} = E \approx 25,6Wh$$

La puissance minimale du panneau est : $P_c = \frac{E_{\text{jour}}}{H}$

Donc : **$P_c \approx 6,4W$**

Avec : H représente le nombre d'heures d'ensoleillement efficace par jour.

5- Optimisation de l'énergie électrique

❑ Choix de matériel

Batterie : italiKa

- Tension : 12V
- Capacité : 3 Ah
- Prix : 150 Dh



Panneau solaire : BOCHRO

- Tension : 12V
- Puissance crête : 10 W
- Prix : 200 Dh



Régulateur de charge PWM : W88-C

- Tension : 12/24V
- Courant : 30 A
- Prix : 280 Dh



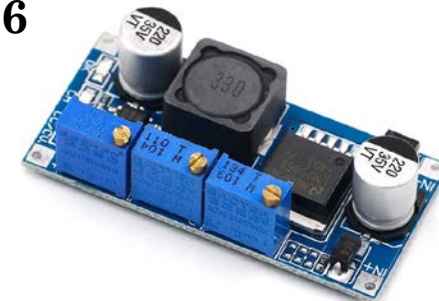
Pompe : pompe à membrane

- Tension : 5V
- Courant : 0.35 Ah
- Prix : 250 Dh



Convertisseur DC-DC : LM2596

- Tension : 12V (sortie 0 à 12V)
- Courant maximal : 2 A
- Prix : 53 Dh



5- Optimisation de l'énergie électrique

Convertisseur
DC-DC : LM2596

Nous avons réglé
une tension stable
de 5V pour
alimenter la pompe
et la carte de
commande

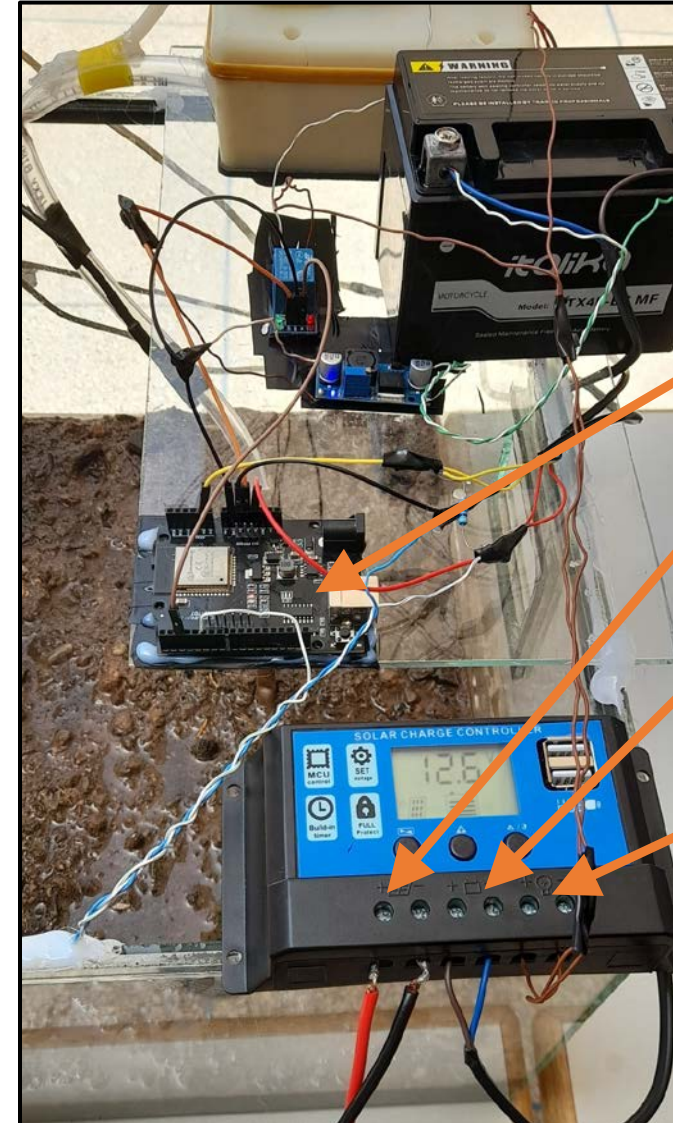


Carte de commande
: ESPDUINO - 32

Broches PV

Broches
Batterie

Alimentation
en 12V



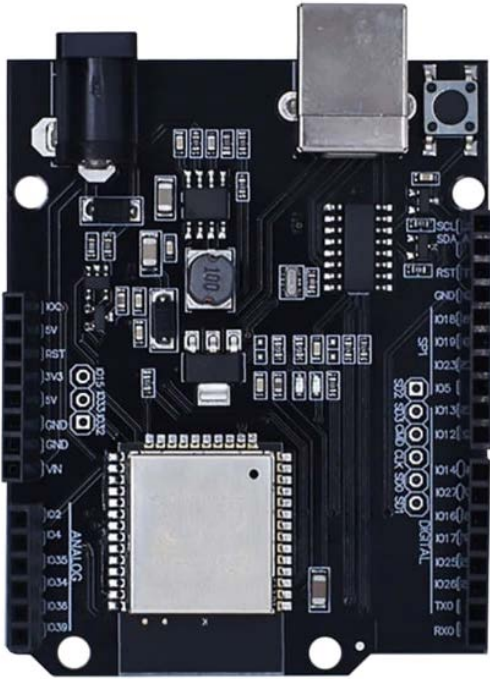
1- Description

La communication sans fil et le contrôle à distance constituent aujourd'hui un enjeu important dans les systèmes connectés.

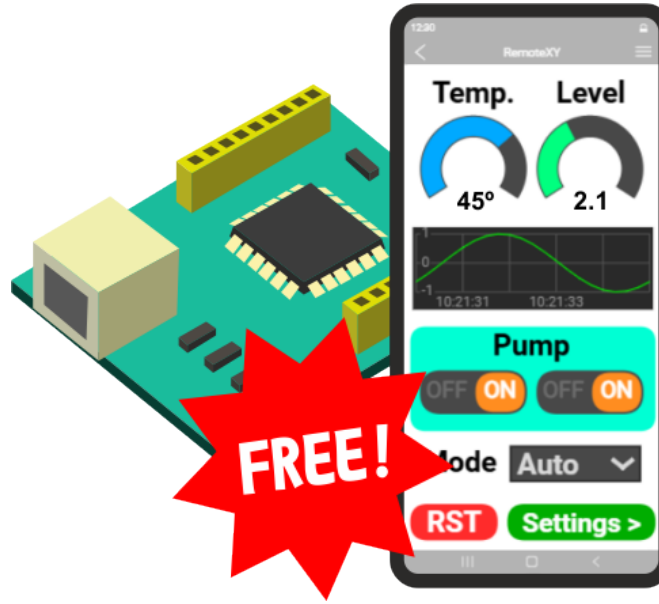
Ce système permet de transmettre à l'utilisateur les grandeurs mesurées et de recevoir ses commandes de contrôle. Il vise ainsi à concevoir une plateforme de supervision et de commande accessible à travers une application mobile.



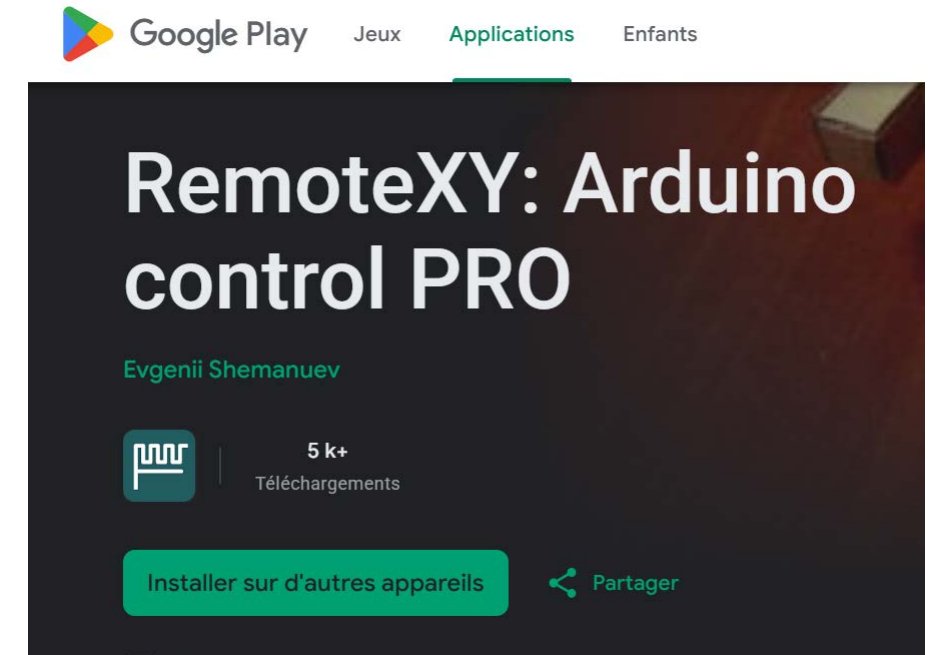
2- Réalisation de plateforme



Carte ESPDUINO 32 :
Dispose un module Wifi
pour le contrôle à
distance



Site Web RemoteXY :
www.remotexy.com
Pour développment de la
plate forme



Application mobile RemoteXY Apk :
Une application pour la visionnage de
la plateforme développée

2- Réalisation de plateforme

The screenshot displays the RemoteXY web interface, a platform for creating user interfaces for IoT projects. The interface is divided into three main sections: Elements, Properties, and a central workspace.

Elements: This section on the left lists various UI components categorized under Controls and Indication. Controls include Button, Push switch, Switch, Selector switch, Option selector, Edit field, Slider, Joystick, and RGB color. Indication includes Time picker, Date picker, and Time zone picker.

Properties: This section on the right allows configuration of the selected element. It includes fields for Configuration (Device name in app, Access password), View (Background color, Screen formats), and Pages (Add, page_main, page_01).

Workspace: The central area shows a project named "L3AWENI" on a grid. A preview of the mobile app is displayed, showing a climate control interface with the following content:

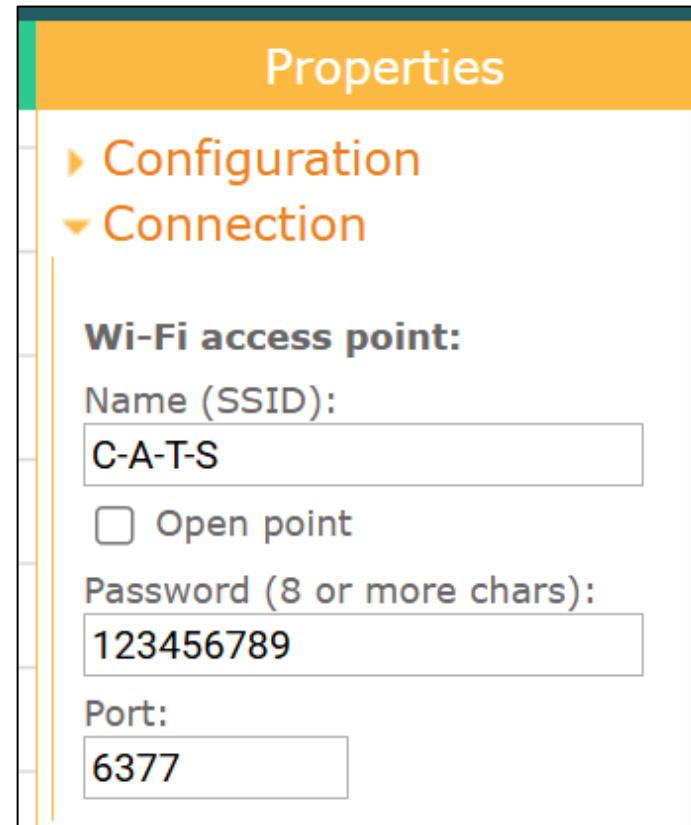
- Header: 12:30, RemoteXY
- Title: Climatisation à travers le sol
- Section: CNC 2026 - INSEA (p1, p2)
- Mode de fonctionnement: Auto (OFF, ON), Manu
- Température section:
 - Temp. sol: 0.0 °C
 - T. Extérieur: 0.0 °C
 - T. Maison: 0.0 °C
- Footer: A. EL AOUNI, CPGE OUJDA

A "Get source code" button is visible above the preview.

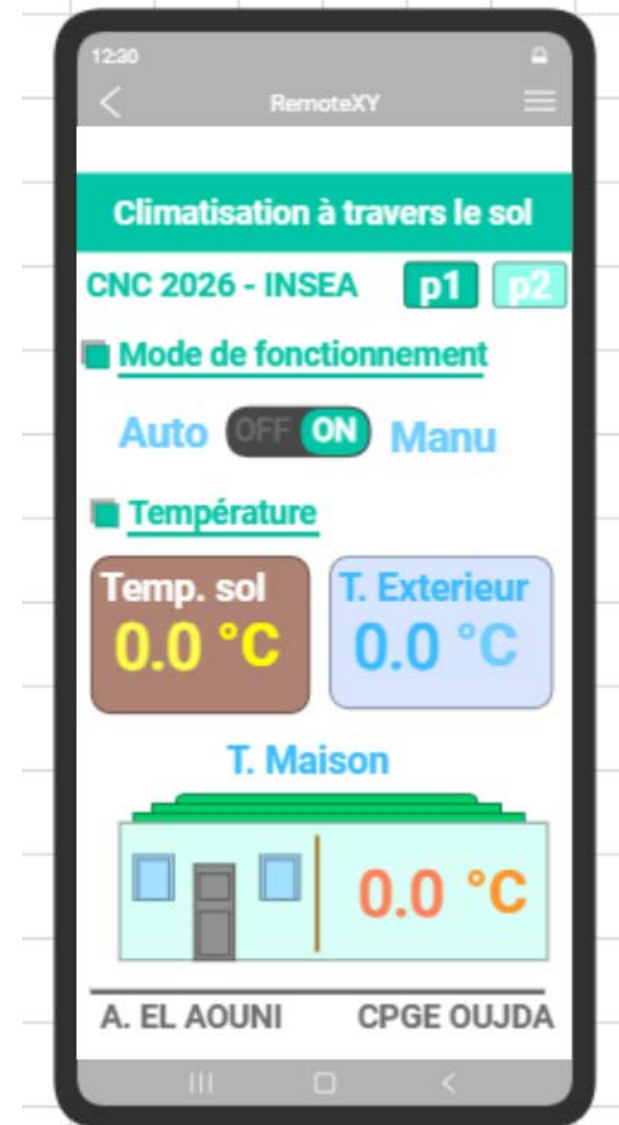
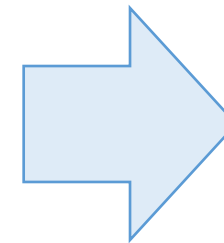
2- Réalisation de plateforme



Configuration matérielle

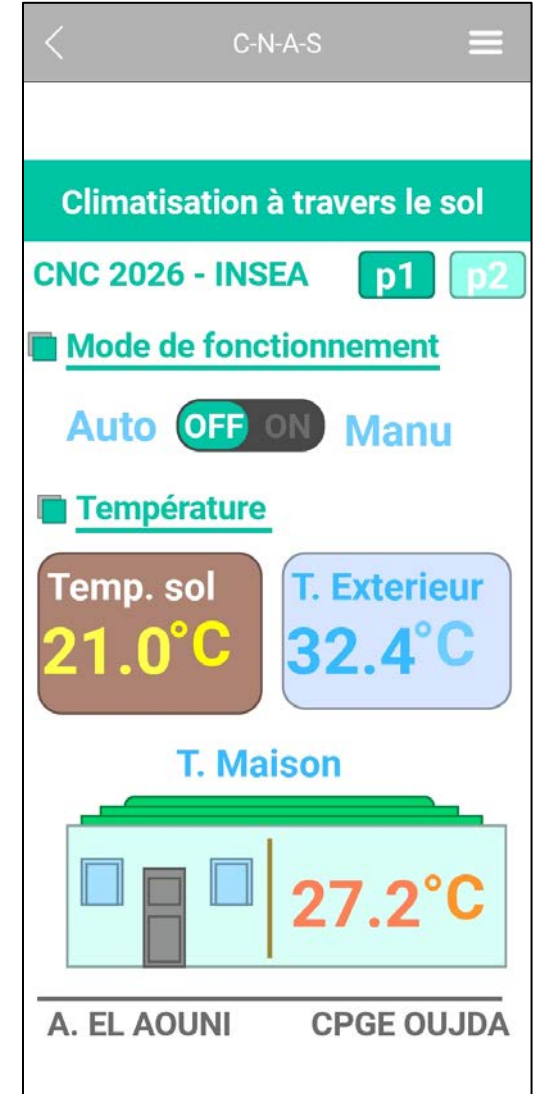
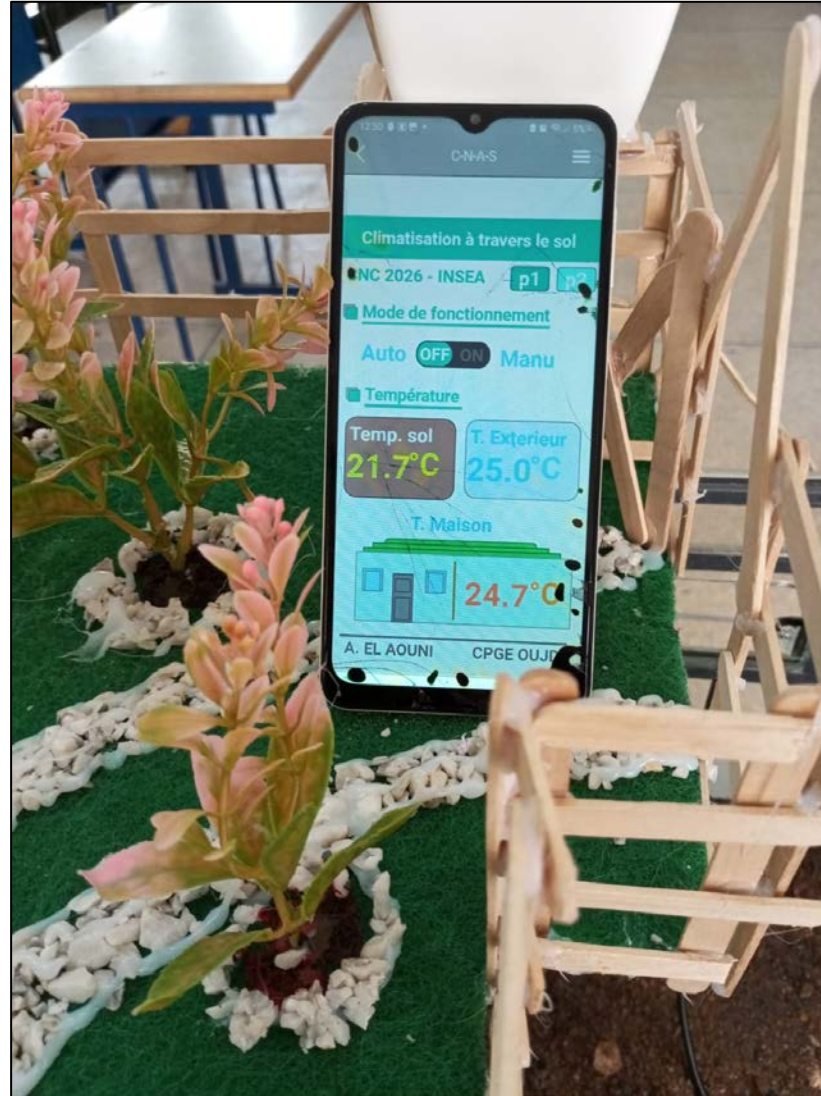
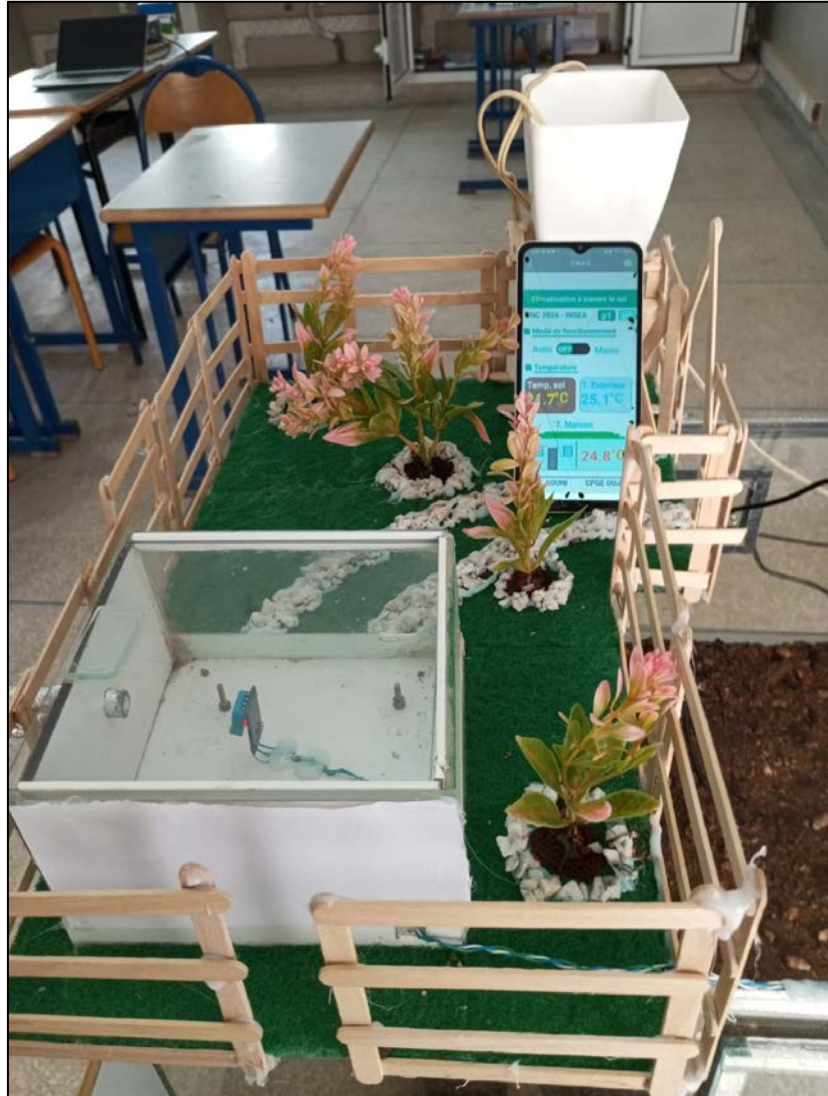


Cordonnées Wi-Fi

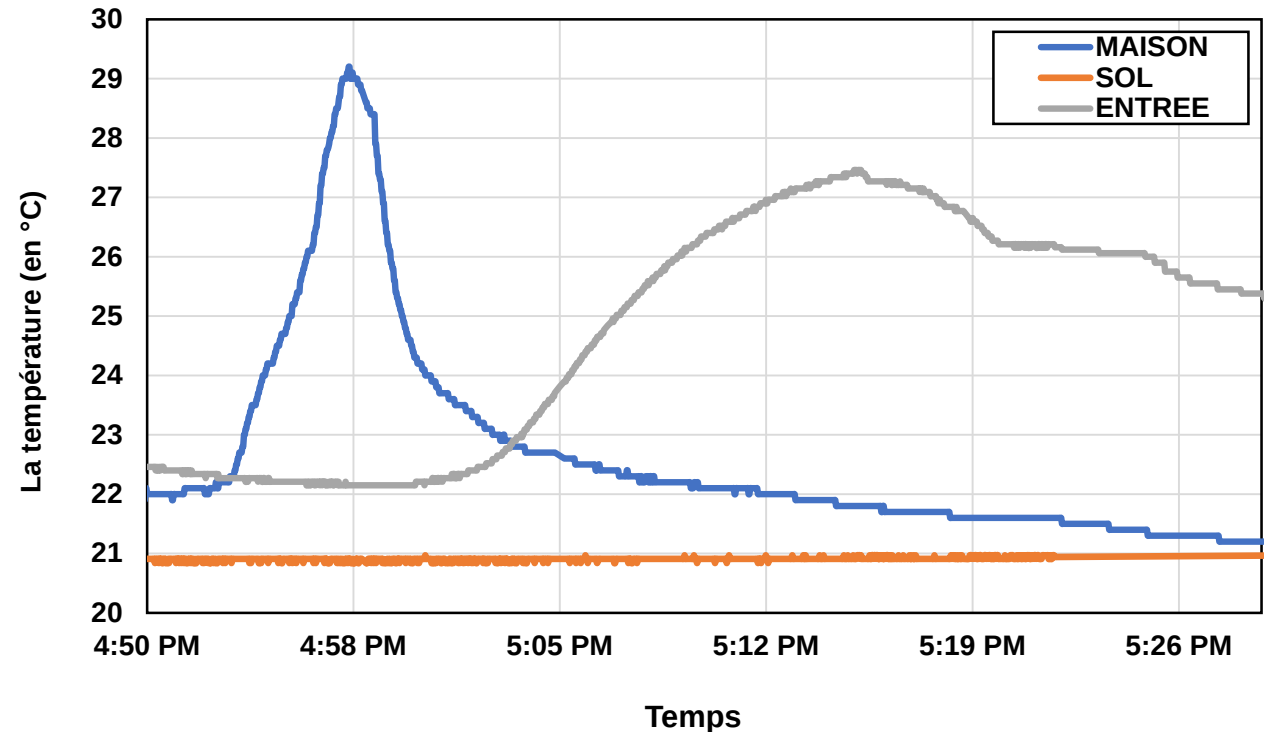


Plateforme

3- Résultats

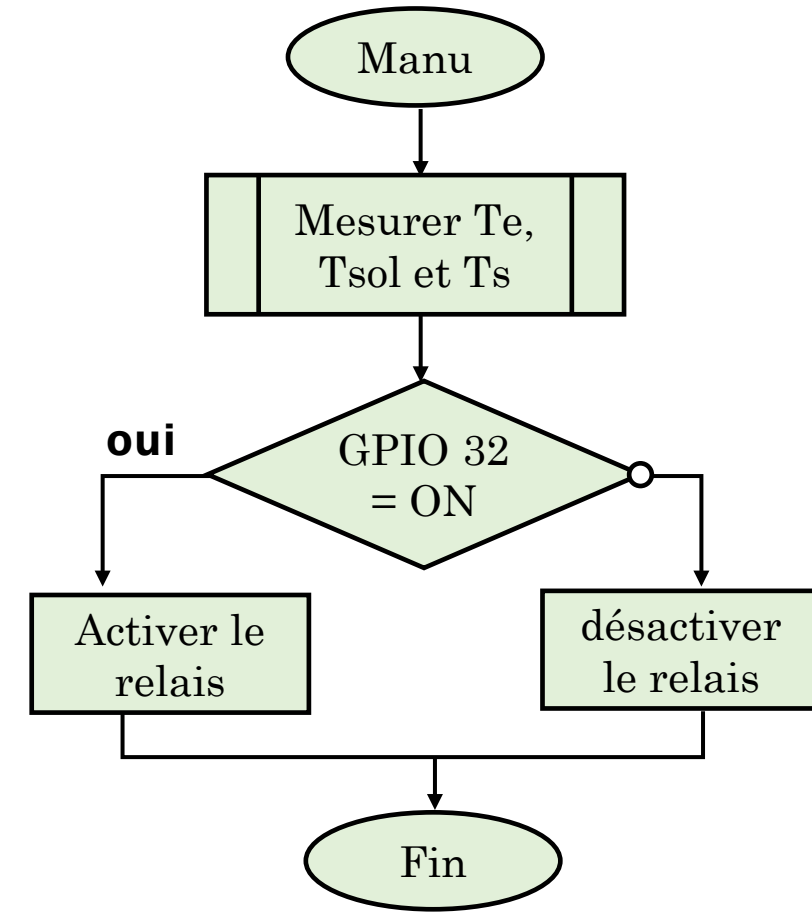
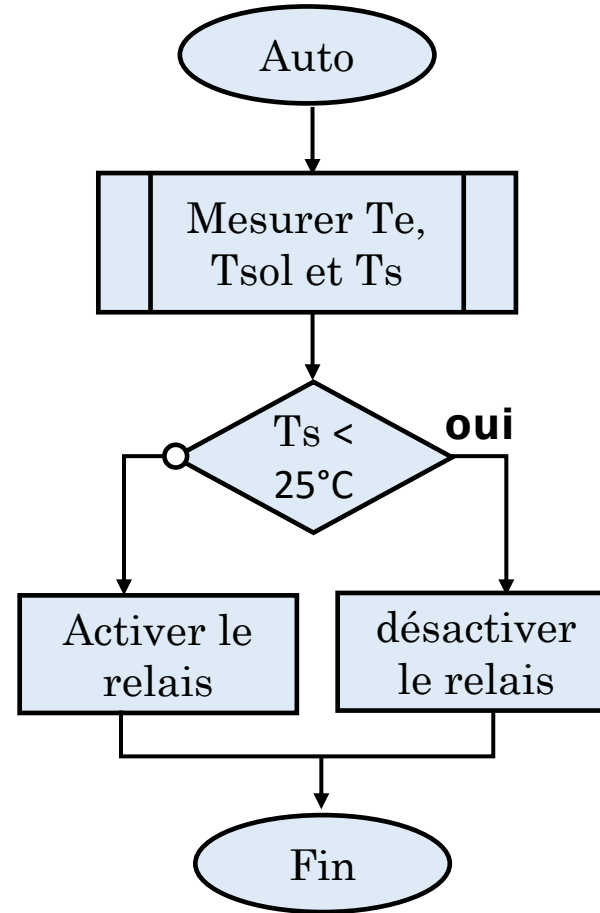
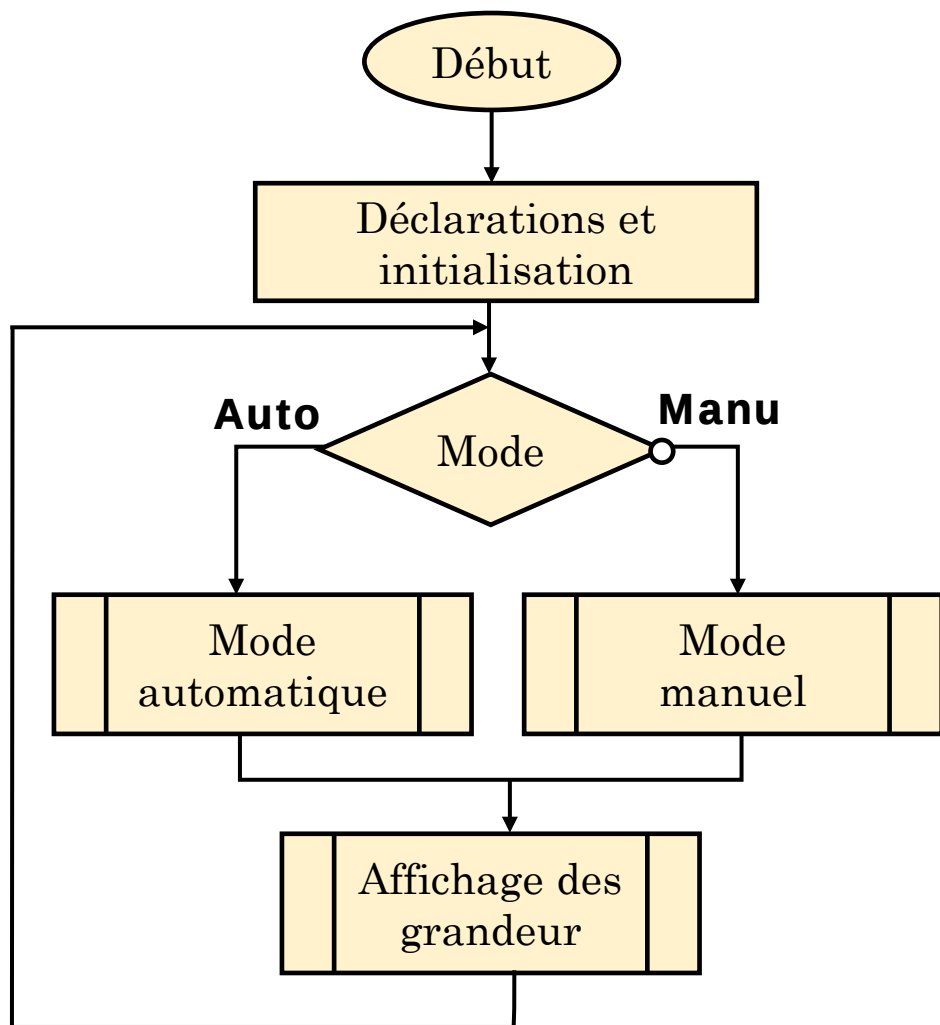


4- Teste final de prototype



- o Chauffage de la maison pendant 2 min, de 16h55 à 16h57.
- o Lancement du refroidissement à 17h00.
- o À 17h28, la température intérieure de la maison tend vers la température du sol.

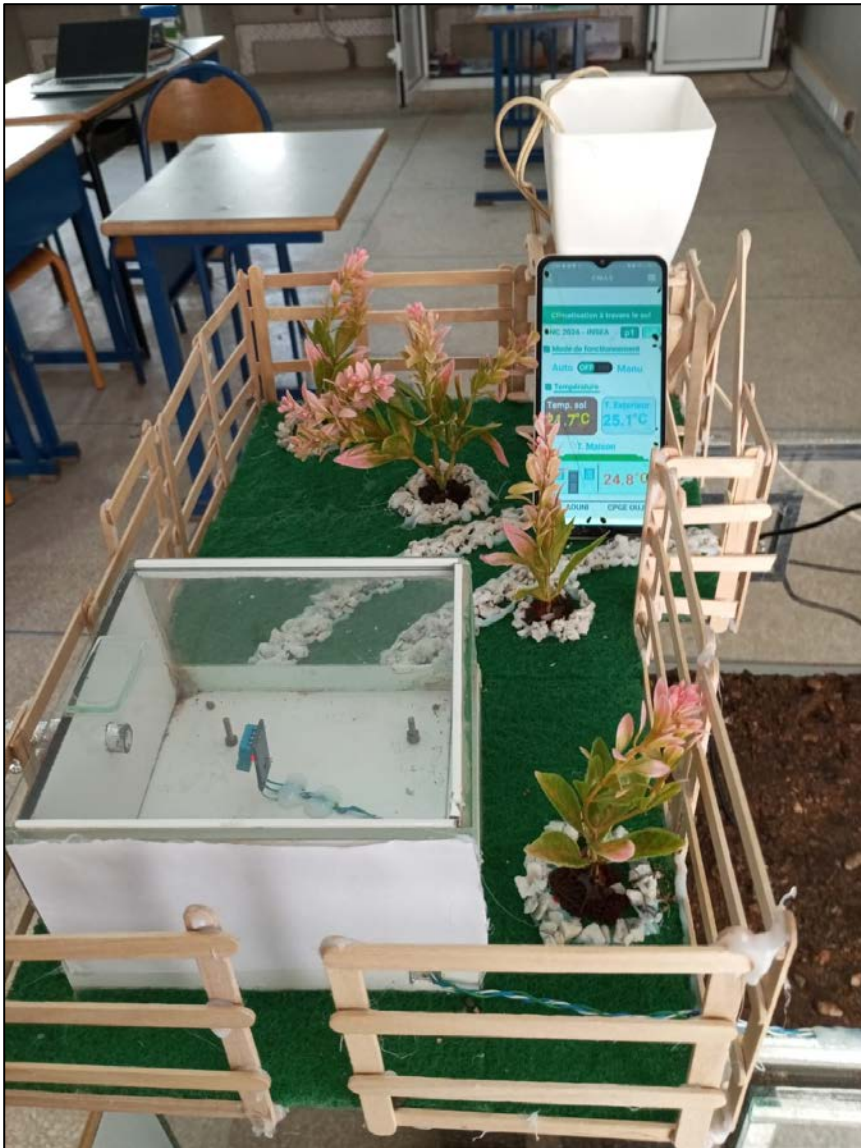
5- Organigramme de fonctionnement de système



Prix total de prototype

Eléments	Montant
Boitier en vert (sol)	200 dhm
Boitier vers/aluminium (maison)	50 dhm
Décoration de la maison	44 dhm
Tuyau en cuivre	80 dhm
Tuyau en plastique	10 dhm
Capteurs DS18B20	130 dhm
DHT11	30 dhm
Pompe à membrane	250 dhm
ESPDUINO32	200 dhm
Relais	45 dhm
Module LM2596	53 dhm
colle à pistolet + scotch aluminium et plastique	100 dhm

Eléments	Montant
Régulateur de charge PWM	280 dhm
Batterie	150 dhm
Panneau solaire	44 dhm
Total	1666 dhm



*Ce travail a permis d'étudier, de modéliser et de réaliser un prototype de climatisation naturelle basé sur l'échange thermique entre l'air extérieur et le sol. Les essais expérimentaux montrent que le sol peut jouer le rôle d'une source froide relativement stable, permettant d'obtenir un gain de refroidissement d'environ **1 à 1,5 °C** , avec une amélioration lorsque le sol est humide. Le prototype valide donc le principe d'une solution simple, économique et compatible avec une alimentation solaire photovoltaïque. Même si le gain reste limité à l'échelle du prototype, cette approche est prometteuse pour réduire la consommation énergétique.*

Enfin, l'encadrement de nos professeurs, à travers leurs conseils, leur écoute et leur accompagnement technique, nous a permis d'adopter une véritable démarche d'ingénieur.

Merci pour
votre attention