



**LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique**

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Réalisation d'un régulateur
solaire**

Réalisé Par :

**Louguit Amine
Baba Mohammed**

Encadré par :

Mechaqrane Abdellah (FST FES)

Allouhi Amine (EST FES)

Soutenu le 05 Juin 2018 devant le jury

Pr Mechaqrane Abdellah (FST FES)

Pr Essbai Najia (FST FES)

Pr Abdi Farid (FST FES)

Avant-propos

La Faculté des Sciences et Techniques offre une formation en plusieurs disciplines (Génie électrique, Génie mécanique et Génie informatique et autre.) Délivrant des diplômes LST.

La dernière année de la formation licence se termine par un projet effectué dans le domaine industriel, la vocation de ce dernier est de clore la formation des lauréats par une confrontation avec le monde du travail où l'étudiant est amené à appliquer toutes ses connaissances théoriques sur le terrain, à compléter La formation et à relever tous les défis concernant sa vie professionnelle.

Le stage de fin d'études demeure donc une expérience primordiale dans la vie De tout lauréat, en fait, c'est une porte qui sépare d'un pas, une vie estudiantine prochainement quittée et une vie professionnelle qui réalisera ses rêves et Assurera son avenir.

Remerciements

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant **Mr. MECHAQRANE ABDELLAH** pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous tenant à remercier sincèrement **Mr. ALLOUHI AMINE**, qui, en tant que professeur universitaire à la Ecole Supérieure de Technologie de Fès, s'est toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer.

Nous adressons de vifs remerciements à **Mr. ABDERRAHMANE BAMOU**, gérant de l'entreprise **Elec énergie**, de nous avoir accueilli et intégré au sein de son équipe. Merci pour son apprentissage et sa collaboration tout au long de ce stage.

Merci également à **Mr. JORIO MOHAMMED** responsable de la Filière Génie électrique, qui nous a dirigés durant notre formation de spécialité.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du corps professoral, le staff administratif de la FST-Fès et spécialement à Monsieur le doyen **Mr. MUSTAPHA IJJAALI**.

Enfin, nous tenons à remercier nos parents et nos familles pour leurs soutiens, qui nous a permis de concrétiser nos ambitions dans les meilleures conditions.

Table des matières

Avant-propos	1
Remerciements.....	2
Liste des figures et tableaux	5
Liste des équations.....	6
Introduction générale.....	7
Chapitre I : PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE D'ACCUEIL ELEC ENERGIE	8
I. Présentation de l'entreprise :	9
1. Historique d'Elec énergie :	9
2. L'organigramme d'Elec énergie :	9
3. Les activités de la société :	10
4. Les appels d'offre les plus importants reçus par la société :	11
5. Fiche technique :	12
6. Cahier de charge :	12
II. Généralités sur les chauffe-eaux solaires :	12
1. Introduction :	12
2. Les types de chauffe-eaux solaires :	13
1.1. Les chauffe-eaux monoblocs [1] :	13
1.2. Les chauffe-eaux à éléments séparés (Convection naturelle ou thermosiphon) [1] :	14
1.3. Les chauffe-eaux auto vidangeable ou Drainback [2] :	15
1.4. Les chauffe-eaux à circulation forcée classique [2] :	16
3. Caractéristiques techniques :	17
3.1. Le capteur solaire [3] :	17
3.2. Le réservoir ou ballon de stockage :	19
3.3. Le circulateur :	19
3.4. Le fluide caloporteur	20
3.5. Les régulateurs	20
4. Conclusion	21
Chapitre II : LA RÉGULATION	22
1. Introduction :	23
2. Régulation par « tout ou rien » ou « On-Off » :	24
3. Régulation PID :	27
3.1. Identifications du système :	28
3.2. Méthode de Strejc-Davoust [4] :	28
3.3. Simulation de la boucle sur Matlab/Simulink :	31

3.4. Méthodes de réglages des paramètres du régulateur PID :	31
4. Régulation de l'appoint :	34
4.1. Description du système :	34
4.2. Contrôle de l'appoint électrique :	35
4.3. Les résultats expérimentaux [8] :	35
5. Conclusion :	37
Chapitre III : RÉALISATION D'UN RÉGULATEUR DIFFÉRENTIEL	38
1. Introduction :	39
2. Partie matérielle :	39
2.1. Choix de la carte programmable :	39
2.2. Carte ARDUINO :	40
2.3. Capteur de température DS18B20 :	40
2.4. Les afficheurs LCD :	41
2.5. Module de relais :	42
2.6. Module L298 :	42
2.7. Alimentation 12V pour Arduino :	43
2.8. Le module DS1307 :	43
2.9. Etude économique de la solution adaptée :	44
3. Partie logicielle :	44
3.1.1. Plateforme de programmation Arduino :	44
3.1.2. Description du code utilisé :	45
3.1.3. La réalisation sous « PROTEUS Isis » :	45
i. Déroulement de la simulation :	46
ii. Tests effectués :	47
4. Conclusion :	48
Conclusion générale	49
Annexe: Code Arduino	50
Références :	59

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Installation Photovoltaïque	11
Figure 2 : Chauffe-eau solaire monobloc	14
Figure 3 : Chauffe-eau solaire thermosiphon	15
Figure 4 : Chauffe-eau solaire auto vidange	16
Figure 5 : Chauffe-eau solaire a circulation forcée	17
Figure 6 : Capteurs plans.....	18
Figure 7 : Capteurs a tubes sous vide	18
Figure 8 : Ballon de stockage	19
Figure 9 : Circulateur (30 volt).....	19
Figure 10 : Steca TRA301PWM	21
Figure 11 : Régulation sans hystérésis	24
Figure 12: Schéma simplifié d'une régulation différentielle.....	25
Figure 13 : Organigramme de la régulation différentielle.....	26
Figure 14 : Cycle d'hystérésis.....	26
Figure 15 : Régulation avec hystérésis.....	27
Figure 16 : Schéma fonctionnel d'un processus régulateur par un PID classique	28
Figure 17 : Méthode graphique	29
Figure 18: Evolution de la température en fonction du temps	29
Figure 19 : Evolution de température selon le modèle.....	31
Figure 20: Schéma bloc sous Matlab Simulink.....	31
Figure 21 : Réponse du système en utilisant “la méthode simple”	32
Figure 22: Réponse du système en utilisant “la méthode de Ziegler-Nichols ”	33
Figure 23 : Appoint intégré électrique	34
Figure 24 : Exemple d'une résistance d'appoint.....	34
Figure 25 : Fonctionnement du chauffe-eau(journée ensoleillée).....	36
Figure 26 : Fonctionnement du chauffe-eau sans appoint (journée nuageuse)	36
Figure 27 : Fonctionnement de l'installation couplée à l'énergie d'appoint.....	36
Figure 28 : Schéma synoptique de la carte Arduino Uno.....	40
Figure 29 : Thermomètre numérique DS18B20	41
Figure 30 : Afficheur LCD 16x2, affichage noir sur fond vert	41
Figure 31 : Relais a deux canaux.....	42
Figure 32 : Module L298	42
Figure 33 : ALIMENTATION ARDUINO 12V 1,25A JACK 2,1MM.....	43
Figure 34 : DS1307 de Maxim Integrated.....	43
Figure 35 : Icône Isis	45
Tableau 1 : Les types des capteurs tubes sous vides.....	10
Tableau 2 : fiche technique de l'entreprise Elec Energie	12
Tableau 3 : Tableau pour l'identification paramétrique du modèle de Strejc.....	30
Tableau 4 : Ajustage de gains de régulateur P, PI et PID selon la première méthode de Ziegler-Nichols	32
Tableau 5 : liste des composant électroniques et leur prix.....	44

Liste des équations

Équation 1 : Condition de démarrage de la pompe.....	25
Équation 2 : <i>Condition d'arrêt de la pompe</i>	25
Équation 3 : Description temporelle du régulateur PID.....	27
Équation 4 : Formule général de la fonction de transfert donné par Strejc.....	28

Introduction générale

L'augmentation brutale du prix du pétrole et le risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile, ont conduit l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables, parmi lesquelles l'énergie solaire caractérisée par sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et son coût de fonctionnement réduit qui offre ainsi dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

L'énergie solaire présente néanmoins l'inconvénient d'être intermittente, aléatoire et déphasée avec les besoins. Toutefois, cette énergie est bien adaptée à certaines applications comme le pompage au fil du soleil ou aux applications thermiques ou thermodynamiques où l'on peut stocker l'énergie thermique et différer son utilisation par rapport à sa production (au cours de la journée). Ainsi, l'énergie solaire est bien adaptée à la production d'eau chaude sanitaire. En témoigne la progression très forte des chauffe-eaux solaires dans le monde.

Cette présente étude s'intéresse, en particulier, à la problématique de la régulation de la température de l'eau du ballon de stockage d'un chauffe-eau solaire. Le but étant de maintenir la température de l'eau à une température de consigne bien définie en orchestrant la circulation du fluide caloporteur entre le ballon et les collecteurs solaires et la mise en marche du système d'appoint en cas d'insuffisances du rayonnement solaire.

Le manuscrit est organisé en trois chapitres complétés par une partie annexe et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, il sera question de présenter un aperçu sur l'histoire de l'entreprise d'accueil, Elec Energie, et donnera une vision générale sur le projet réalisé. On présentera aussi un état de l'art sur les différents types de chauffe-eaux solaires.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des règles de régulation (différentiel et PID) pour les pompes et l'appoint électrique.

Finalement, la troisième partie sera consacrée à la présentation des outils techniques utilisés et à l'environnement de programmation et simulation.

Chapitre I : PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE D'ACCUEIL ELEC ENERGIE

I. Présentation de l'entreprise :

1. Historique d'Elec énergie :

Sous la devise « Save Our Planet » ELEC-ENERGIE est une société marocaine Commence son activité en 2011. Elle est née de la volonté d'agir sur le monde en limitant l'impact de la consommation énergétique sur l'environnement, notamment dans le cadre d'une stratégie énergétique nationale à l'horizon de 2030. Cette entreprise fondée par deux personnes :

➤ **M. Abderrahmane BAMOU :**

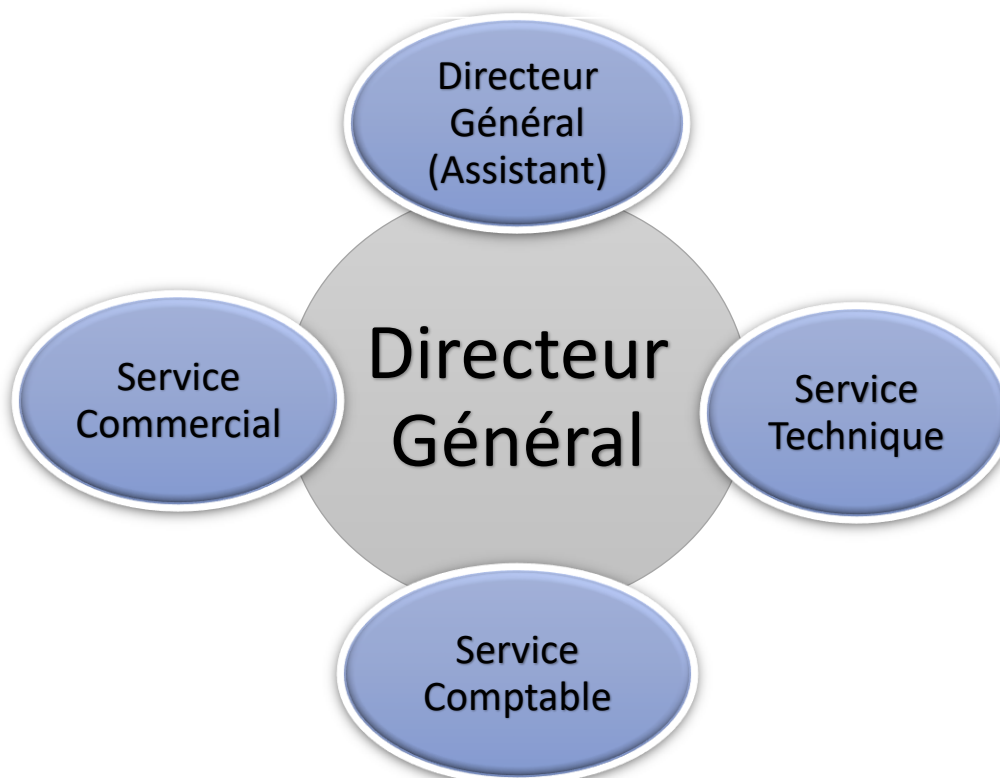
Directeur technique ou directeur général celui-ci s'occupe de mettre en route les chantiers et de diriger les équipés, réaliser les commandes de matériels.

➤ **M. Mohammed ABDALLAOUI :**

Directeur commercial celui-ci s'occupe de voir les clients dimensionner les installations puis réaliser des devis il est Techno-commercial.

2. L'organigramme d'Elec énergie :

Elec Energie repose sur une architecture solide où la direction au sein du site est chargée d'un rôle qui lui permettra d'améliorer l'activité de l'entreprise. La figure ci-après nous donne un aperçu général sur les différentes directions d'Elec Energie.



3. Les activités de la société :

ELEC-ENERGIE est une entreprise pionnière dans le secteur énergétique au Maroc. Sa mission est d'offrir un accompagnement énergétique professionnel.

Parmi les activités de cette entreprise on cite :

- ❖ L'installation des chauffe-eaux solaire de gammes différentes.

Généralement, l'installation d'un chauffe-eau solaire nécessite 3 à 4 jours. Aussi, celle-ci se déroule en différentes étapes :

- La pose des panneaux solaires
- Le raccordement du ballon
- Le passage des liaisons solaires
- La mise en service

Tableau 1 : Les types des capteurs tubes sous vides

Gamme	Volume de ballon solaire	Nombre de tubes	Rendement optique HO	Coefficient de déperdition thermique	Type de circulation
STAR	150 L	15	0.84	1.01	Naturelle
SUNNY	200 L	20	0.84	1.01	Naturelle
EXCELLENCE+	300 L	30	0.84	1.01	Naturelle
SUPREME	350 L	36	0.84	1.01	Naturelle
MASTERPIECE	Sans limite	15/20/30	0.7	3.9	Forcée

- ❖ L'installation et le Pompage photovoltaïque.

- Les panneaux photovoltaïques
- Les batteries.
- Les régulateurs.
- Les onduleurs

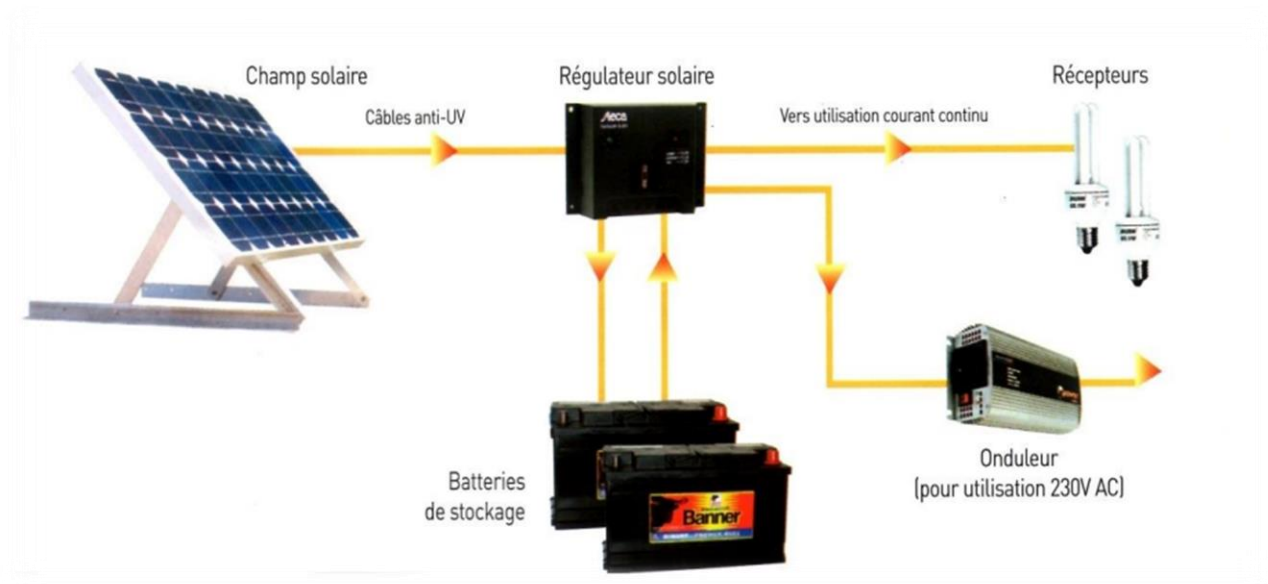


Figure 1 : Installation Photovoltaïque

❖ **Vente de tous les matériels d'énergie solaire.**

- Lampadaire solaire (de type LED).
- Les pompes d'eau solaire.
- Les capteurs de températures.
- Variateur solaire...

✓ **L'habitation solaire.**

✓ **L'éclairage public.**

4. Les appels d'offre les plus importants reçus par la société :

En 2012 : Installation des Chauffes Eau Solaires à l'Association des handicapés de Fès...

En 2013 : Installation des Pompes Solaires à Kindar Sidi Khir, à Ait Hachlaf, à Anouassar.

En 2014 :

- Installation de l'Eclairage Public à Saidia.
- Installation d'une pompe solaire à l'EST de Fès
- Installation des chauffe-eaux solaire à wtat lhaj, Fès.
- Installation des installations photovoltaïques à wtat lhaj.

5. Fiche technique :

Tableau 2 : fiche technique de l'entreprise Elec Energie

Raison sociale	ELEC ENERGIE
Forme juridique :	SARL
Date de création :	31/12/2012
Siège social	20 rue Ben Zarte, Avenue Urbain-Soussa (Rte Imouzzer Montfleury 2) 30010 Fès.
Objet social :	Utilisation des produits énergétiques à l'échelle nationale.
Identifiant fiscal	14369003
Registre de commerce	39235
Patente :	13075054
Gmail :	elecenergie.ba@gmail.com

6. Cahier de charge :

Les objectifs escomptés pour ce projet sont :

- Donner une idée générale sur les règles de régulation d'un chauffe-eau solaire a circulation forcée.
- Préciser les composants nécessaires afin de construire un régulateur différentiel qui se caractérise par sa simplicité et fiabilité et son cout réduit.
- Réalisation d'une simulation virtuelle.

II. Généralités sur les chauffe-eaux solaires :

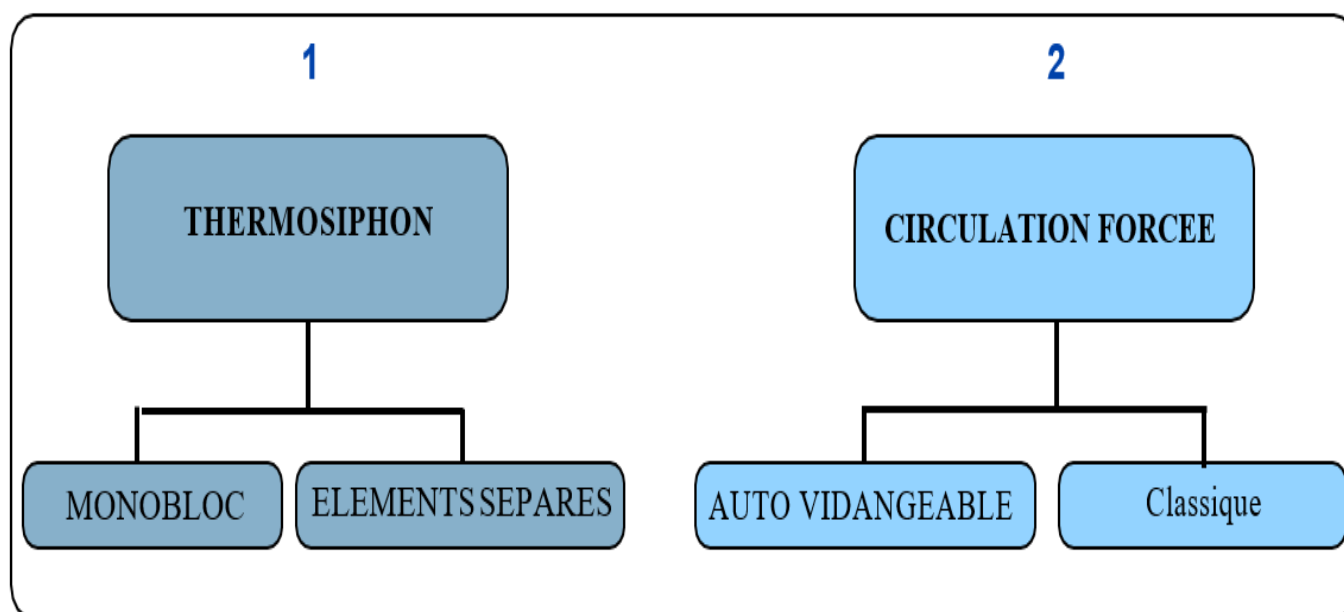
1. Introduction :

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage de l'eau exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse, ...) dans certaines conditions il permet de les remplacer totalement. Opter pour le chauffe-eau solaire, c'est choisir d'exploiter une source d'énergie propre, renouvelable et durable. C'est un choix écologique louable puisqu'en

choisissant d'utiliser le chauffe-eau solaire, l'on réduit les émissions de CO2 tout en luttant contre le réchauffement climatique. En captant l'énergie du soleil, l'on profite d'eau chaude toute l'année, et ce, gratuitement.

2. Les types de chauffe-eaux solaires :

L'on recense de nombreux types de chauffe-eau solaire. D'une manière générale, c'est la surface des panneaux solaires, la capacité du ballon et la forme du chauffe-eau lui-même qui diffère. Il n'est pas rare qu'un particulier qui souhaite faire une installation se perd parmi tous ces modèles.



Ce sont ces modèles qui sont les plus utilisés tant par les particuliers que les professionnels.

1.1. Les chauffe-eaux monoblocs [1] :

Les systèmes monobloc sont des ensembles capteur/ballon simples et complets qui fonctionnent de manière autonome. Leur branchement est extrêmement simple. L'eau circule naturellement, réchauffé par les capteurs, il remonte vers le ballon solaire. Comme l'eau froide est plus lourde que l'eau chaude, elle reste en bas de l'installation. Et l'eau réchauffée remonte. La chaleur est donc transférée jusqu'au stock qui est située au-dessus du capteur.

Ces systèmes simples sont difficilement intégrables dans l'architecture des bâtiments et souvent de dimensions modestes. La position du ballon ne permet pas d'intégrer une source d'énergie d'appoint dans le système. Elle devra se trouver en aval. Dans les climats froids, les canalisations

aller et retour risquent de geler. Ce type de matériel est plutôt adapté aux pays tropicaux, où l'énergie d'appoint n'est pas nécessaire. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de disposer d'un circuit primaire antigel. La position relative du soleil à ces latitudes permet de poser les capteurs relativement à plat sur des toitures en terrasse.

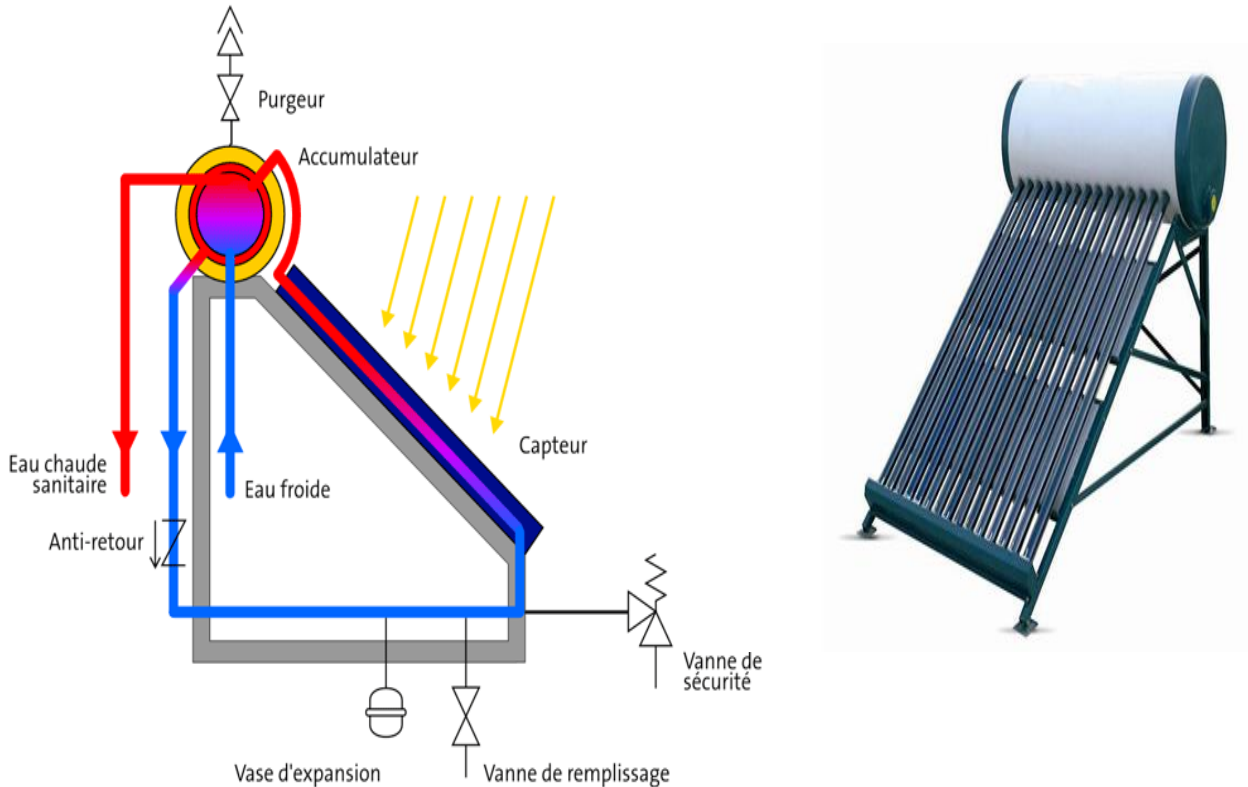


Figure 2 : Chauffe-eau solaire monobloc

1.2. Les chauffe-eaux à éléments séparés (Convection naturelle ou thermosiphon) [1] :

Lorsque la configuration le permet, c'est à dire lorsque le ballon de stockage se situe à une altitude supérieure à celle des capteurs, le chauffe-eau à convection naturelle ou thermosiphon peut être installé. Le principe de fonctionnement réside sur la différence de masse volumique générée par la montée en température dans le capteur, qui va mettre en mouvement le fluide caloporteur. Cette technique ne demande ni pièce mécanique (circulateur), ni régulation. Sa grande simplicité en fait donc un système fiable dans la durée, vu que le nombre de pièces est réduit. Son coût d'investissement est moindre ainsi que son coût de fonctionnement, qui est nul. Le dimensionnement de ce type d'installations doit être effectué de manière à réduire au maximum les pertes de charges dans le circuit. La mise en circulation du fluide s'effectue en général pour des différences de températures (capteur/ballon) de l'ordre de 15°C, ce qui fait que

les performances de ces procédés sont relativement réduites en hiver (fortes déperditions, mauvais rendement).

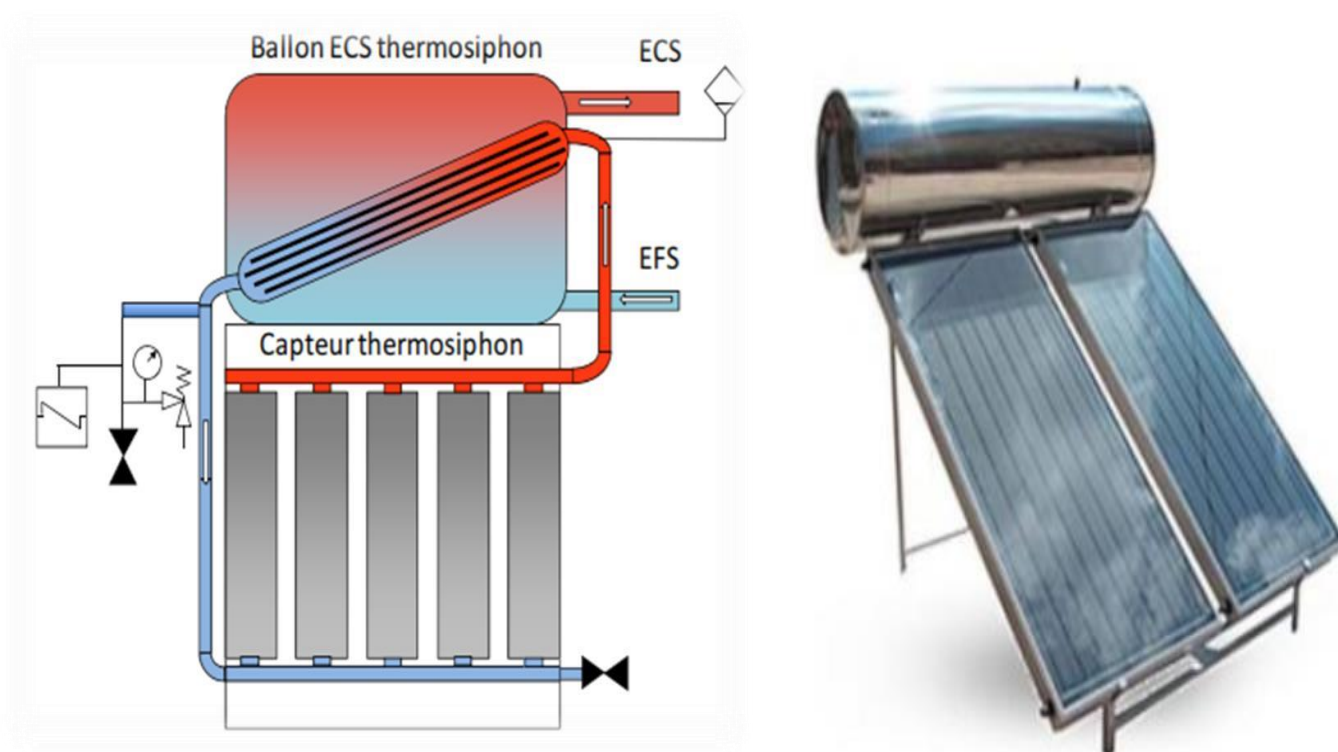


Figure 3 : Chauffe-eau solaire thermosiphon

1.3. Les chauffe-eaux auto vidangeable ou Drainback [2] :

À la différence d'un chauffe-eau solaire à circulation forcée, l'auto vidangeable peut stocker le fluide caloporteur du circuit en zone hors gel ou l'envoyer dans les panneaux lorsqu'il a besoin de chauffer le ballon. Comment cela se passe-t-il ?

Le chauffe-eau solaire auto-vidange diffère des autres systèmes par le fait qu'il présente un fonctionnement unique. Lorsque l'appareil est à l'arrêt, le liquide caloporteur descend vers le bas du circuit solaire. Les tubes et les capteurs solaires quant à eux, se remplissent d'air. Lorsque les sondes détectent une hausse de température suffisante dans les capteurs, l'électronique met en route une pompe qui fait monter le liquide caloporteur vers les capteurs solaires. Lors de son passage dans les capteurs, le liquide se réchauffe et se redirige vers le ballon de stockage. Ce processus permet alors de réchauffer l'eau sanitaire contenue dans le ballon.

Lorsque le ballon de stockage arrive à une température maximale, la pompe s'arrête automatiquement et le liquide redescend vers le réservoir, le liquide dans les panneaux est alors

remplacé par de l'air. Ce qui fait qu'une fois que le ballon de stockage est réchauffé au maximum, le liquide repose et ainsi, les risques de surchauffe et de surpression sont écartés. Le processus est le même en temps de grand froid puisque le système se met aussi en arrêt automatique. Le liquide est ainsi conservé du gel. Les systèmes Drainback ou chauffe-eau solaire auto-vidange ne disposent pas de manomètres ni de vase d'expansion puisque la pression est moindre. Par ailleurs, l'on peut utiliser l'eau comme liquide caloporteur.



Figure 4 : Chauffe-eau solaire auto vidange

C'est vrai que ces trois types de chauffe-eau affichent chacun leurs avantages et leurs inconvénients, toutefois, il convient de rappeler que pour notre cas on s'intéresse juste à l'étude de chauffe-eau solaire classiques, non auto-vidangeables.

1.4. Les chauffe-eaux à circulation forcée classique [2] :

Le chauffe-eau solaire à circulation forcée promet un meilleur rendement thermique et une meilleure intégration du système à l'environnement.

Le chauffe-eau solaire à circulation forcée se compose de deux éléments principaux, le ballon de stockage d'eau et les panneaux solaires. À noter que le ballon contient l'eau de chauffage qui est réchauffée avec la chaleur apportée par le liquide caloporteur et les panneaux servent à conserver la chaleur qui sera ensuite diffusée dans le ballon par le biais du liquide caloporteur. Le ballon et les capteurs solaires sont reliés entre eux avec une pompe, connectée à un régulateur. La pompe va permettre au liquide caloporteur de circuler selon une certaine vitesse et fréquence dans le circuit.



Figure 5 : Chauffe-eau solaire à circulation forcée

3. Caractéristiques techniques :

3.1. Le capteur solaire [3] :

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou collecteur solaire ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre.

Parmi les types de capteurs solaires thermiques on trouve :

Les capteurs plans : dans lesquels le fluide passe dans un serpentin sous une vitre. Ils sont peu coûteux, fonctionnent avec un bon rendement, mais seulement pendant l'été.

Les collecteurs à ou capteurs à tubes sous vide : dans lesquels le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide, le vide étant un isolant presque parfait, ils fonctionnent aussi bien en été qu'en hiver, mais sont aussi plus onéreux.



Figure 6 : Capteurs plans



Figure 7 : Capteurs a tubes sous vide

3.2. Le réservoir ou ballon de stockage :

Appelé réservoir ou ballon de stockage solaire, ce dernier bien isolé, maintient l'eau en température jusqu'à ce qu'elle soit utilisée. Le transfert de chaleur est réalisé par un échangeur monté à l'intérieur du ballon.



Figure 8 : Ballon de stockage

3.3. Le circulateur :

Un circulateur est, dans un chauffe-eau solaire, une pompe placée sur le circuit de chauffage afin de faire circuler le fluide caloporteur, habituellement de l'eau.



Figure 9 : Circulateur (30 volt)

Les circulateurs peuvent être :

- **À vitesse réglable fixe** (cas le plus courant des circulateurs de chauffe-eau et des anciennes installations) : il en existe avec une ou plusieurs (3 ou 4) vitesses de rotation.
- **À vitesse variable** : le circulateur adapte sa vitesse de rotation :
 - soit pour maintenir la pression constante dans le circuit quel que soit le degré d'ouverture des vannes thermostatiques des radiateurs .
 - Soit en diminuant de façon linéaire la pression du circuit en fonction du degré d'ouverture des vannes thermostatiques des radiateurs. Cela permet de diminuer la

consommation du circulateur qui diminue alors sa hauteur manométrique et de diminuer les bruits d'écoulement.

- soit en fonction de la température extérieure ou de la température de l'eau (cas le plus courant lorsqu'il n'y a pas de vanne mélangeuse).

3.4. Le fluide caloporteur

Un fluide caloporteur (aussi appelé caloriporteur) est un fluide ayant la capacité particulière de capturer efficacement et durablement la chaleur ambiante. Il est donc utilisé dans différents systèmes (moteurs, chauffe-eaux solaires, réfrigérateurs, etc.) pour transporter d'un point à un autre de la chaleur, en vue de produire un certain effet. Pour nous, il aura pour rôle de transporter la chaleur accumulée à l'intérieur des capteurs solaires (situés sur le "panneau") jusqu'au ballon d'eau chaude, afin de transmettre la chaleur à l'eau.

3.5. Les régulateurs [10] :

La régulation solaire pilote le(s) circulateur(s) ou vanne(s) en fonction des températures mesurées aux ballon(s) et panneaux. Elle assure également des fonctions de protection et de sécurité de l'installation.

Pour contrôler la température de procédé avec précision, sans intervention considérable de la part de l'opérateur, le système de régulation de température repose sur un régulateur qui accepte des capteurs de température comme entrée tel qu'un thermocouple ou RTD (résistance temperature detector). Il compare la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande.

Il existe plusieurs types de base de contrôleurs, ils diffèrent par :

- Principe de fonctionnement
- Nombre des entrées/sorties
- Affichage
- Prix...

Parmi les fabricants des régulateurs on trouve que la marque Steca monopolise le marché, à cet effet on va présenter l'un de ces produits le plus utilisé au Maroc.

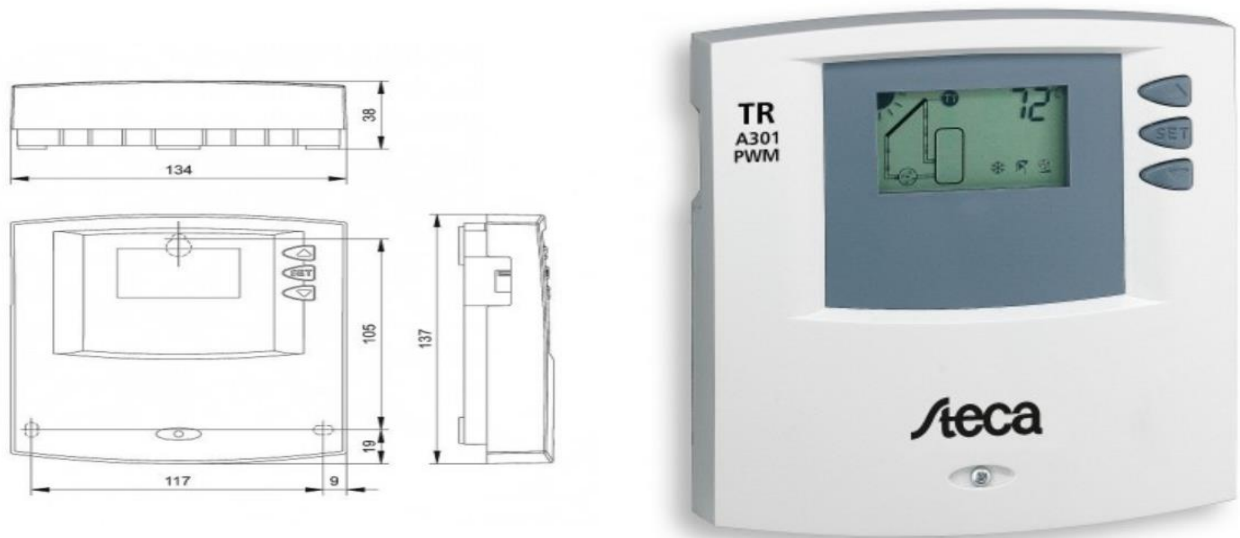


Figure 10 : Steca TRA301PWM

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la société d'accueil ainsi qu'un état de l'art sur les différents types de chauffe-eaux solaires. Nous avons aussi présenté, en fin de chapitre, quelques éléments du circuit du fluide caloporteur dont bien sûr le régulateur qui est l'objet de notre étude.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des règles de régulation pour les circulateurs et l'appoint électrique.

Chapitre II : LA RÉGULATION

1. Introduction :

La régulation dans le domaine des procédés industriels concerne la mise en œuvre de l'ensemble des moyens théoriques, matériels et techniques pour maintenir chaque grandeur physique essentielle égale à une valeur désirée, appelée consigne, par action sur une grandeur réglante, et ce, malgré l'influence des grandeurs perturbatrices du système.

Dans un sens général, la régulation est l'ensemble des techniques permettant de maintenir le bon fonctionnement d'une machine ou l'état d'un système.

Il y'a plusieurs types de régulation industrielle possibles telles que :

- TOR : Tout ou rien, élabore une action de commande qui prend deux positions ou deux états (0 et 1). Les régulateurs tout ou rien sont utilisés pour la commande des systèmes où la précision de régulation n'est pas importante
- PID : Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances du système. Le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriels et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du système.

Les systèmes de régulation sont nécessaires pour toutes les installations solaires, parmi autres les chauffe-eaux solaires. Cependant, un dispositif électronique de régulation et de contrôle de la température est réalisé, ce système permettra de réguler la température de l'eau du ballon de stockage.

En effet deux éléments nécessitent un système de régulation qui sont la pompe et l'appoint électrique.

2. Régulation par « tout ou rien » ou « On-Off » :

2.1. La boucle solaire :

C'est la fonction indispensable à toutes les installations puisqu'elle pilote le circulateur de la boucle solaire. Elle utilise la température en haut des capteurs solaires et celle du ballon de stockage pour décider de mettre en marche ou d'arrêter le circulateur et donc la collecte de chaleur solaire.

Le régulateur a donc deux entrées reliées à deux sondes de température mesurant l'une la température en haut des capteurs solaires, l'autre la température en bas du ballon solaire à l'endroit de l'échangeur solaire.

Le régulateur agit comme suit :

- * Si le capteur solaire est plus chaud que le ballon de stockage, mettre en route le circulateur solaire.
- * Si le capteur solaire est moins chaud que le ballon solaire, arrêter le circulateur solaire

Il suffirait donc d'une simple comparaison entre les deux températures pour commander le circulateur solaire.

En effet, le caloporteur est immobile dans les capteurs, il chauffe donc facilement. Dès que le caloporteur commence à circuler, les capteurs reçoivent du caloporteur froid en entrée et donc leur température baisse.

Ce qui peut conduire à passer sous la température du bas du ballon et donc arrêter le circulateur, l'arrêt du circulateur fait que les capteurs chauffent alors un liquide immobile et le font monter facilement en température, ce qui va faire redémarrer le circulateur.

Le phénomène est illustré dans le graphique ci-dessous :

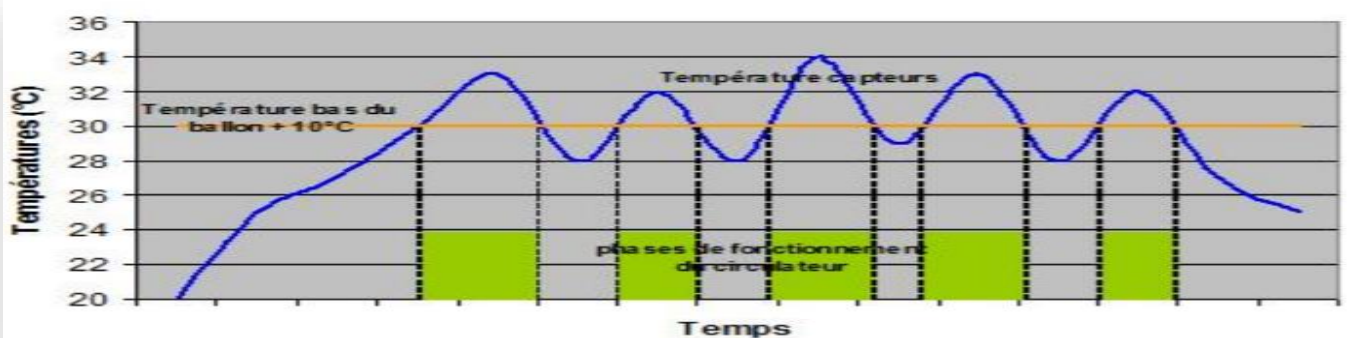


Figure 11 : Régulation sans hystérésis

2.2. Régulation différentielle :

La mise en route et l'arrêt de la pompe de circulation sont assurés par un régulateur différentiel, un comparateur intégré au régulateur calcule la valeur correspondant à l'écart de température $T_c - T_b$. (Sortie capteur ; Bas du ballon) : ΔT

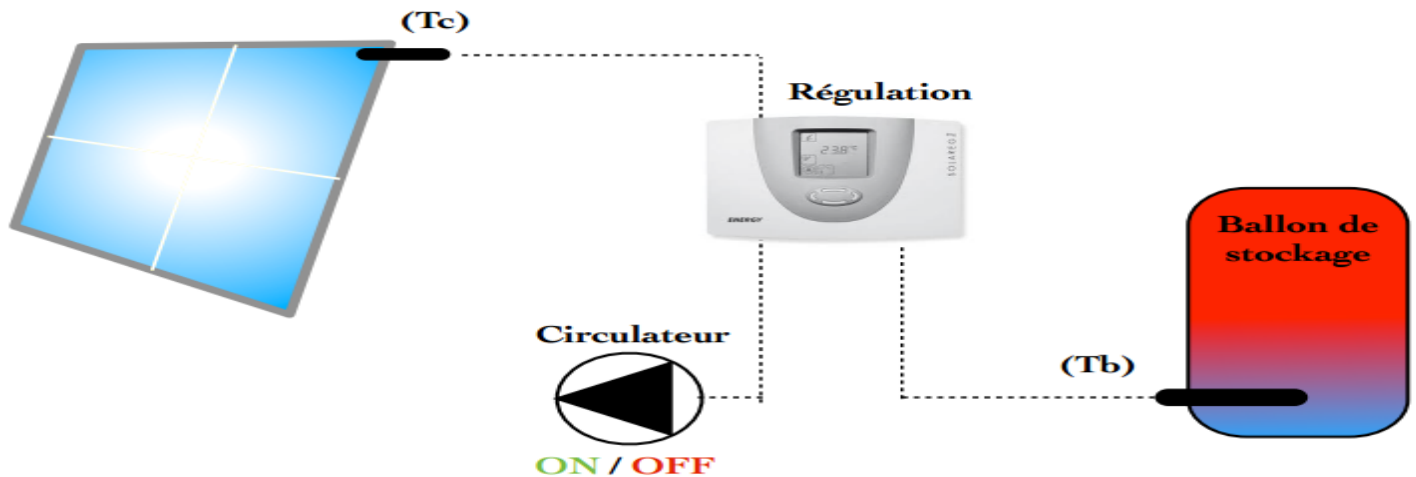


Figure 12: Schéma simplifié d'une régulation différentielle

La valeur calculée ΔT est alors comparée aux différentiels d'arrêt et de démarrage paramètres sur le régulateur :

La circulation du fluide caloporteur s'établit dans les capteurs lorsque :

Équation 1 : condition de démarrage de la pompe

$$\Delta T1 = T_c - T_b > D_D \text{ (Différentiel de Démarrage) } \Rightarrow \text{CIRCULATEUR ON}$$

par contre si :

Équation 2 : condition d'arrêt de la pompe

$$\Delta T2 = T_c - T_b < D_A \text{ (Différentiel d'Arrêt) } \Rightarrow \text{CIRCULATEUR OFF}$$

La circulation du fluide caloporteur est interrompue.

Voir l'organigramme suivant :

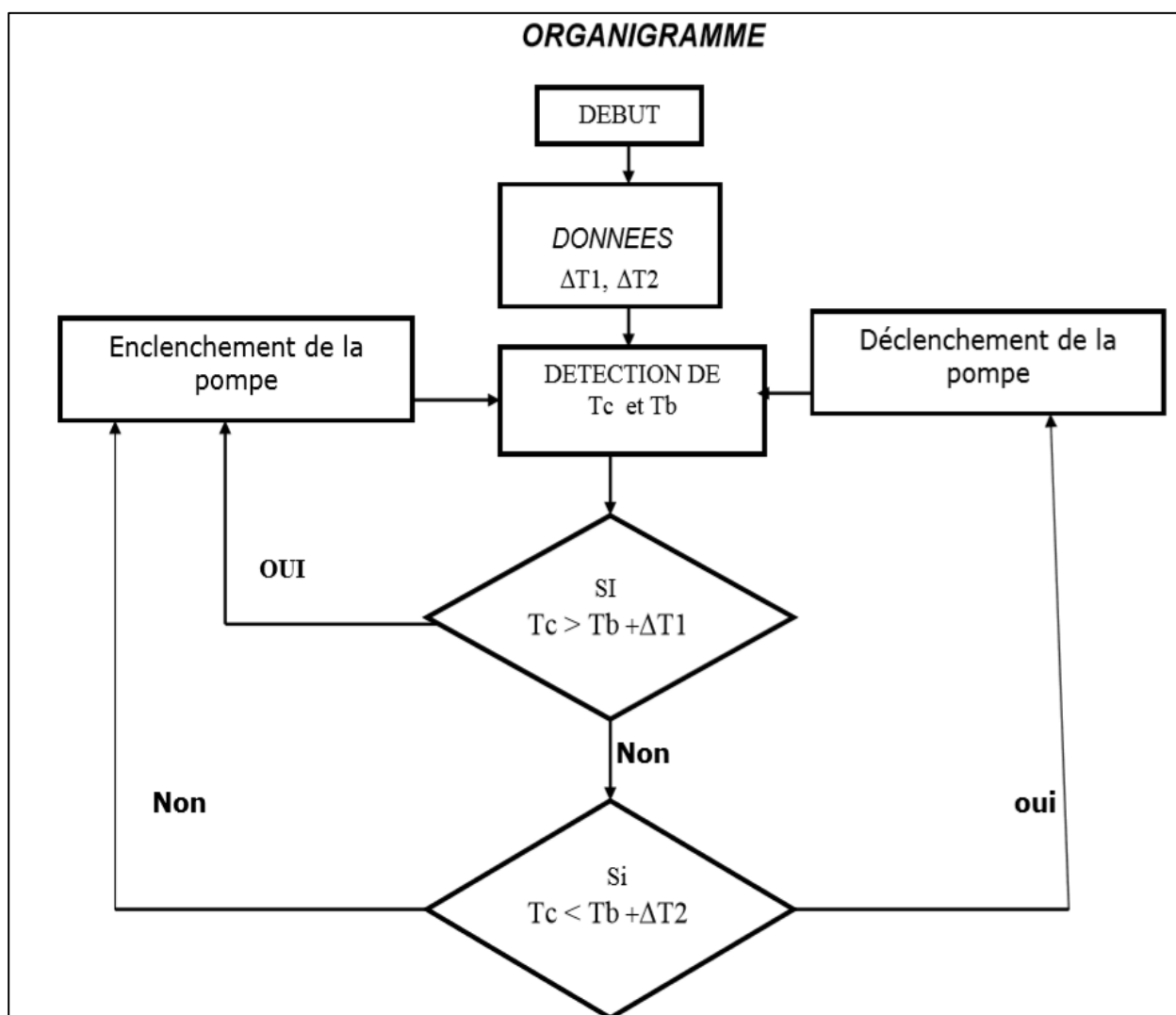


Figure 13 : Organigramme de la régulation différentielle

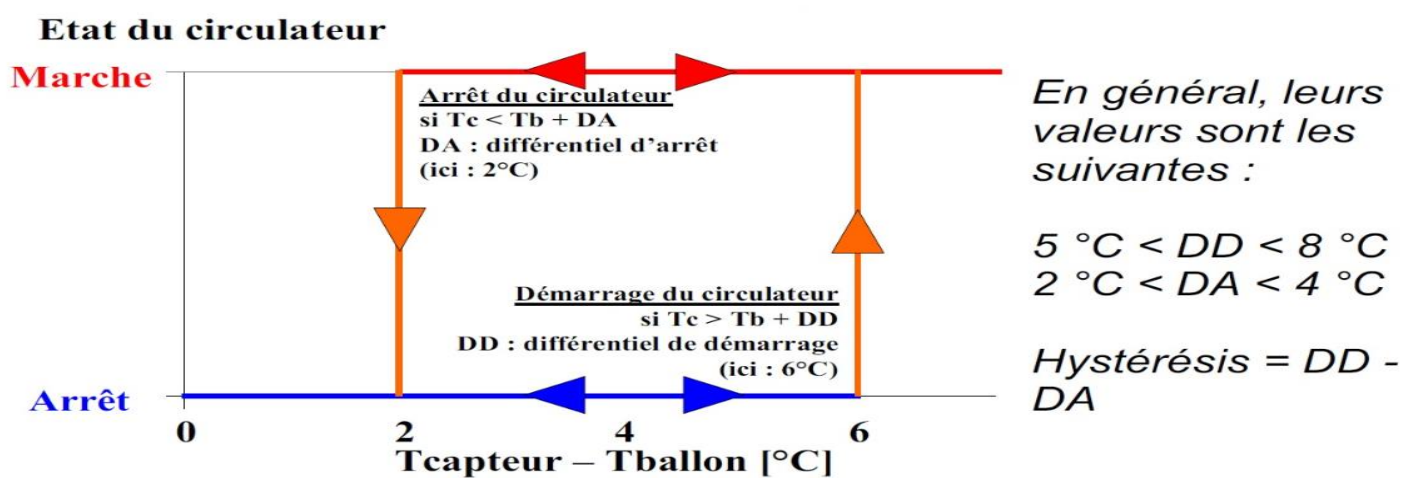


Figure 14 : Cycle d'hystérésis

Le graphique ci-dessus illustre l'impact positif de l'hystérésis sur la commande du circulateur :

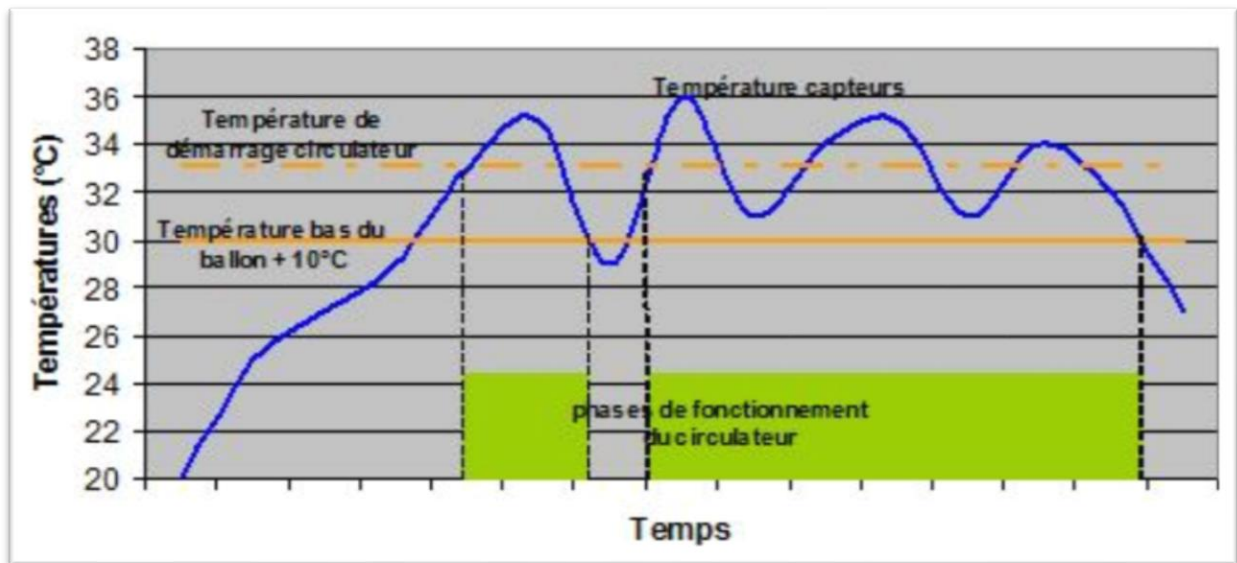


Figure 15 : Régulation avec hystérésis

Le différentiel empêche les "claquements" de sortie, ou les commutations continues et rapides qui peuvent endommager la pompe.

3. Régulation PID :

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois termes P, I et D, où le 'P' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et 'D' pour le terme dérivé de la commande. Les régulateurs PID sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel. Même les plus complexes systèmes de contrôle industriel peuvent comporter un réseau de contrôle dont le principal élément est un module de contrôle PID.

Ce régulateur élabore, à partir du signal d'erreur $\varepsilon(t)$, une commande $u_c(t)$ en fonction de trois actions proportionnelle, intégrale, dérivée.

Sa description temporelle est la suivante :

Équation 3 : description temporelle du régulateur PID

$$\begin{aligned}
 U_c(t) &= K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \\
 &= K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}
 \end{aligned}$$

Avec :

Kp : gain d'action proportionnelle.

Ki=1/Ti : gain d'action intégrale.

Kd=Td : gain d'action dérivée.

Ti : constante de temps, dite temps d'action intégrale.

Td : constante de temps, dite temps d'action dérivée.

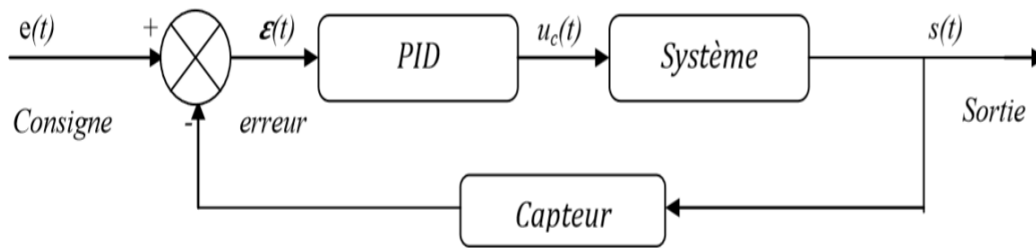


Figure 16 : Schéma fonctionnel d'un processus régulateur par un PID classique

Cette partie a pour but, d'implémenter la commande PID classique pour la régulation de la température de l'eau contenue dans le ballon de stockage d'un chauffe-eau solaire, pour cela on est obligée d'abord de modéliser notre système (chauffe-eau) par une fonction de transfert qui approche au maximum le comportement du système réel en utilisant la méthode d'identification de Strejc, ensuite on intègre cette fonction dans la boucle de régulation.

3.1. Identifications du système :

Identifier un procédé ou système consiste à proposer une structure entre son entrée et sa sortie et à déterminer à partir du couple entrée-sortie, les valeurs des paramètres du modèle. Le modèle ainsi trouvé doit, dans son domaine de validité, se comporter comme la réalité (physique) ou au moins s'en approcher au plus près.

3.2. Méthode de Strejc-Davoust [4] :

Strejc assimile la réponse indicielle de tout système stable apériodique présentant un point d'inflexion à celle d'un modèle à n constantes de temps. Ce modèle porte le nom du modèle de Strejc :

Équation 4 : Formule général de la fonction de transfert donné par Strejc

$$H(p) = \frac{K}{(1+Tp)^n} * e^{-\tau p} \begin{cases} K: \text{Le gain statique} \\ T: \text{constate de temps} \\ n: \text{ordre du modele} \end{cases}$$

Pour déterminer les paramètres de ce modèle, on procède comme suit :

- Sur la courbe de réponse expérimentale, on trace le mieux possible la tangente au point d'inflexion :

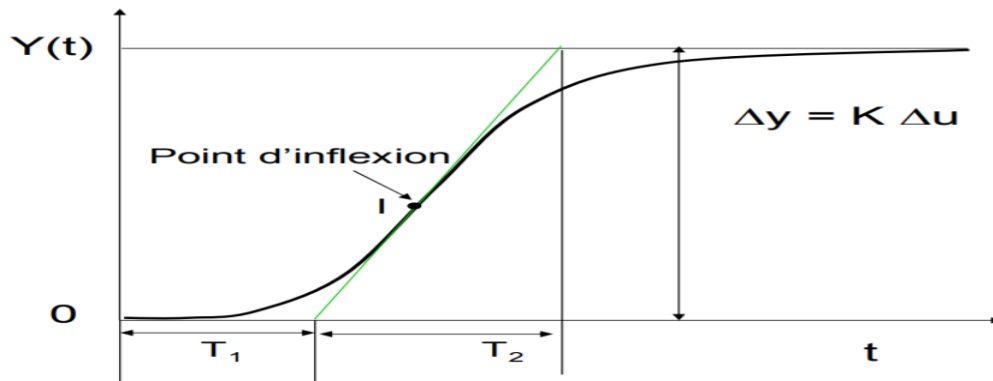


Figure 17 : Méthode graphique

Vu qu'on n'a pas eu la possibilité de réaliser une expérience pour mesurer la réponse indicielle de notre système, on s'est basé sur les résultats expérimentaux fournis par Francis Bielsa [7], dans le cas d'un système à circulation forcée avec eau glycolée.

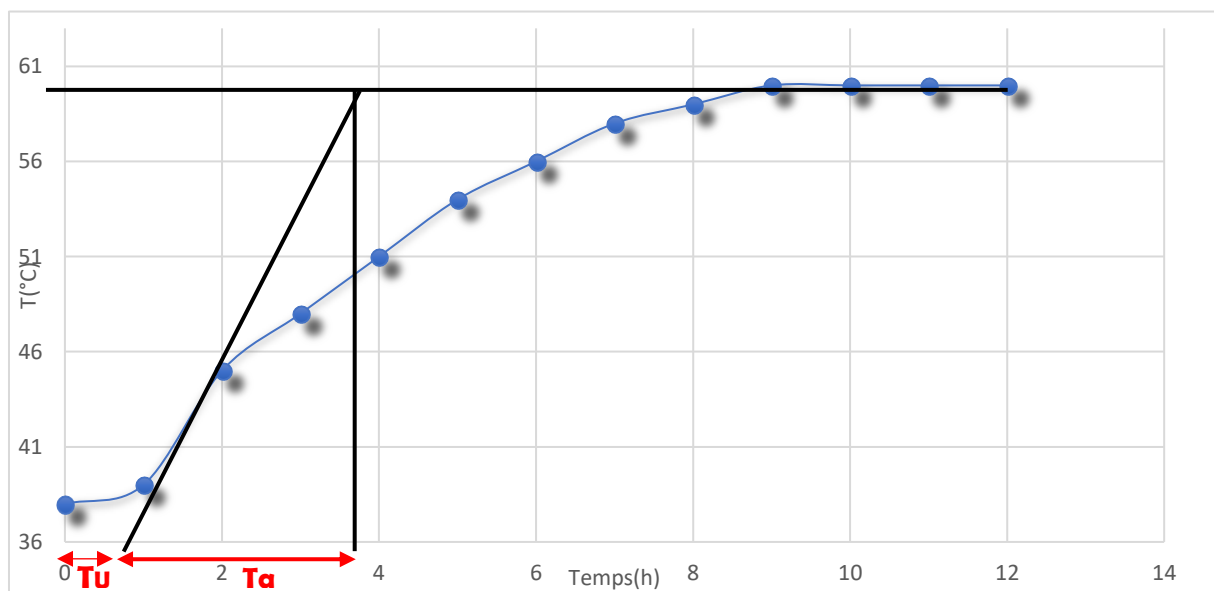


Figure 18: Evolution de la température en fonction du temps

- On relève différents paramètres (T_u , T_a) comme le montre la figure 17 .

On trace la tangente au point d'inflexion I et on mesure : $T_u = 0.8h$ et $T_a = 3.7h$

- A l'aide du tableau (3), on détermine les paramètres n et T du modèle

Tableau 3 : Tableau pour l'identification paramétrique du modèle de Strejc

n	$\frac{T_a}{T}$	$\frac{T_u}{T}$	$\frac{T_u}{T_a}$
1	1	0	0
2	2,718	0,282	0,104
3	3,695	0,805	0,218
4	4,463	1,425	0,319
5	5,119	2,100	0,410
6	5,699	2,811	0,493
7	6,226	3,549	0,570
8	6,711	4,307	0,642
9	7,164	5,081	0,709
10	7,590	5,869	0,773

On 'a :

$$\frac{T_u}{T_a} = \frac{0.8}{3.7} = 0.216, \text{ On choisit la valeur de } n \text{ la plus petite, donc } n=2.$$

$$\frac{T_a}{T} = 2.718, \text{ alors } T = 1.36 \text{ h.}$$

$$\tau = T_{UR} - T_{UT} = 0.8 - 0.104 \cdot 3.7 = 0.65 \text{ h comme } T_u / T_a = 0.104 \text{ pour } n=2.$$

D'où la fonction de transfert :

$$H(p) = \frac{K}{(1 + 1.36p)^2} * e^{-0.65p}$$

On peut approximer la fonction $e^{-0.65p}$ par $\frac{1}{1+0.65p}$ (développement limite au voisinage de 0) pour faciliter les calculs.

- Le gain statique $k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{60-38}{60} = 0.36$

$$H(p) = \frac{0.36}{(1 + 1.56p)^2} * e^{-0.65p}$$

$$H(p) = \frac{0.36}{(1 + 1.36p)^2(1 + 0.65p)}$$

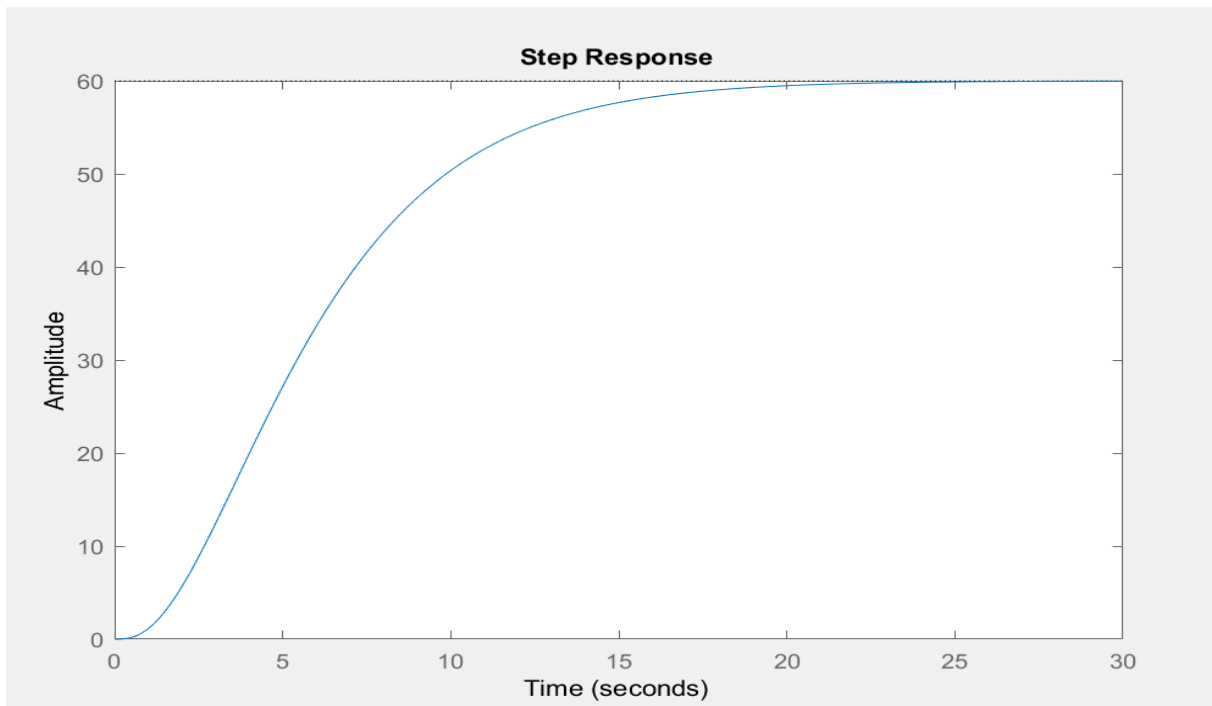


Figure 19 : Evolution de température selon le modèle mathématique

3.3. Simulation de la boucle sur Matlab/Simulink :

Après avoir déterminé la fonction du transfert du système on passe à la simulation sous Matlab / Simulink. La figure suivante présente le schéma bloc utilisé

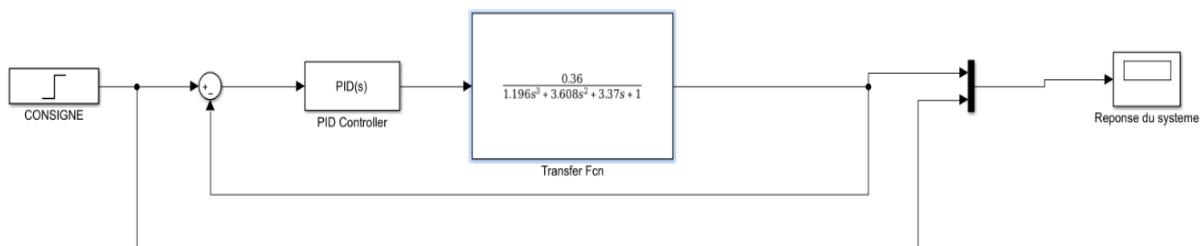


Figure 20: Schéma bloc sous Matlab Simulink

3.4. Méthodes de réglages des paramètres du régulateur PID :

De manière quantitative, il s'agit de proposer les actions (P, I, D) du régulateur et de fixer les valeurs à donner aux paramètres (K_p , T_i , T_d) répondant le mieux possible aux spécifications d'un cahier des charges. Dans notre cas il faut que la réponse de système (température de l'eau à utiliser) suit la consigne (60 °C).

Le problème de la détermination des régulateurs est connu par la synthèse des systèmes bouclés. Les méthodes de synthèse sont très nombreuses et une classification rigoureuse n'est pas une tâche facile. Néanmoins, on distingue dans le cadre de notre étude deux types de méthodes :

❖ Méthode simple [5] :

On fixe les valeurs I et D à zéro, on augmente ensuite le gain P jusqu'à ce que la sortie de la boucle oscille. Puis, on augmente le gain I jusqu'à ce que cesse l'oscillation. Enfin, on augmente le gain D jusqu'à ce que la boucle soit suffisamment rapide pour atteindre rapidement sa consigne.

En utilisant cette méthode, voici le résultat trouvé :

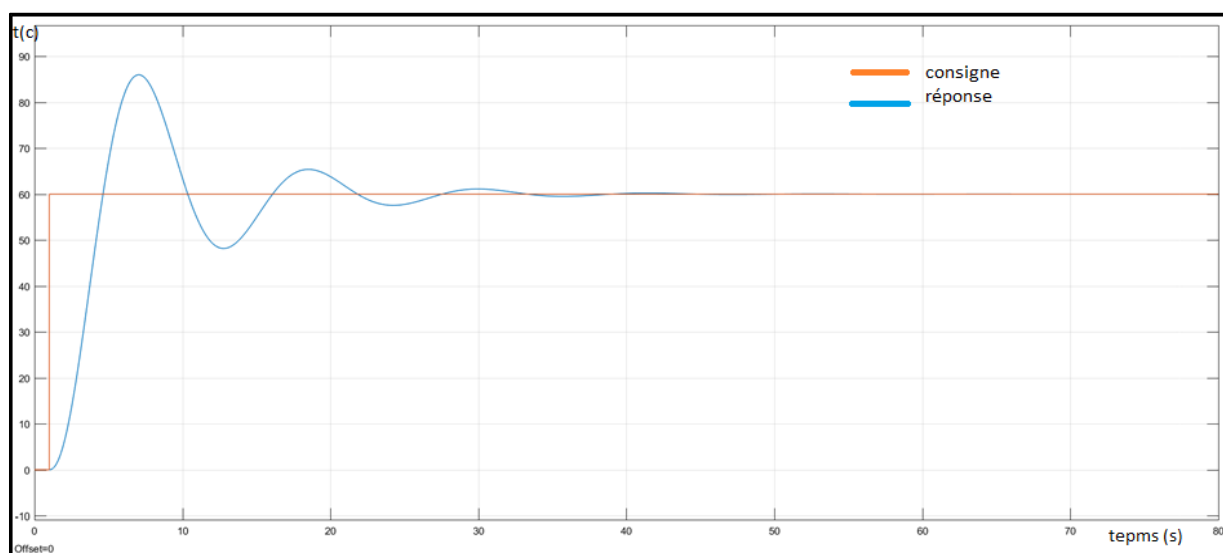


Figure 21 : Réponse du système en utilisant “la méthode simple”

❖ Méthode de Ziegler-Nichols [6] :

On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau :

Tableau 4 : Ajustement de gains des régulateurs P, PI et PID selon la première méthode de Ziegler-Nichols

Type	Kp	Ti	Td
P	$\frac{Ta}{Tu}$	-	-
PI	$0.9 \frac{Ta}{Tu}$	$3.3 \times Tu$	-
PID	$1.2 \times \frac{Ta}{Tu}$	$2 \times Tu$	$0.5 \times Tu$

On détermine les paramètres du correcteur depuis le tableau sachant que le PID est de type parallèle de fonction de transfert : $R(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d p}{(1 + 0.1 T_d p)} \right)$

Avec $P = K_p$, $I = K_r/T_i$ et $D = K_r \cdot T_d$:

$$K_p = 5.55$$

$$T_i = 2 * 0.8 = 1.6$$

$$T_d = 0.5 * 3.7 = 0.4$$

$$\text{Donc, } P = 5.55, I = \frac{5.55}{1.6} = 3.46, D = 5.55 * 0.4 = 2.22$$

On a obtenu la réponse suivante :

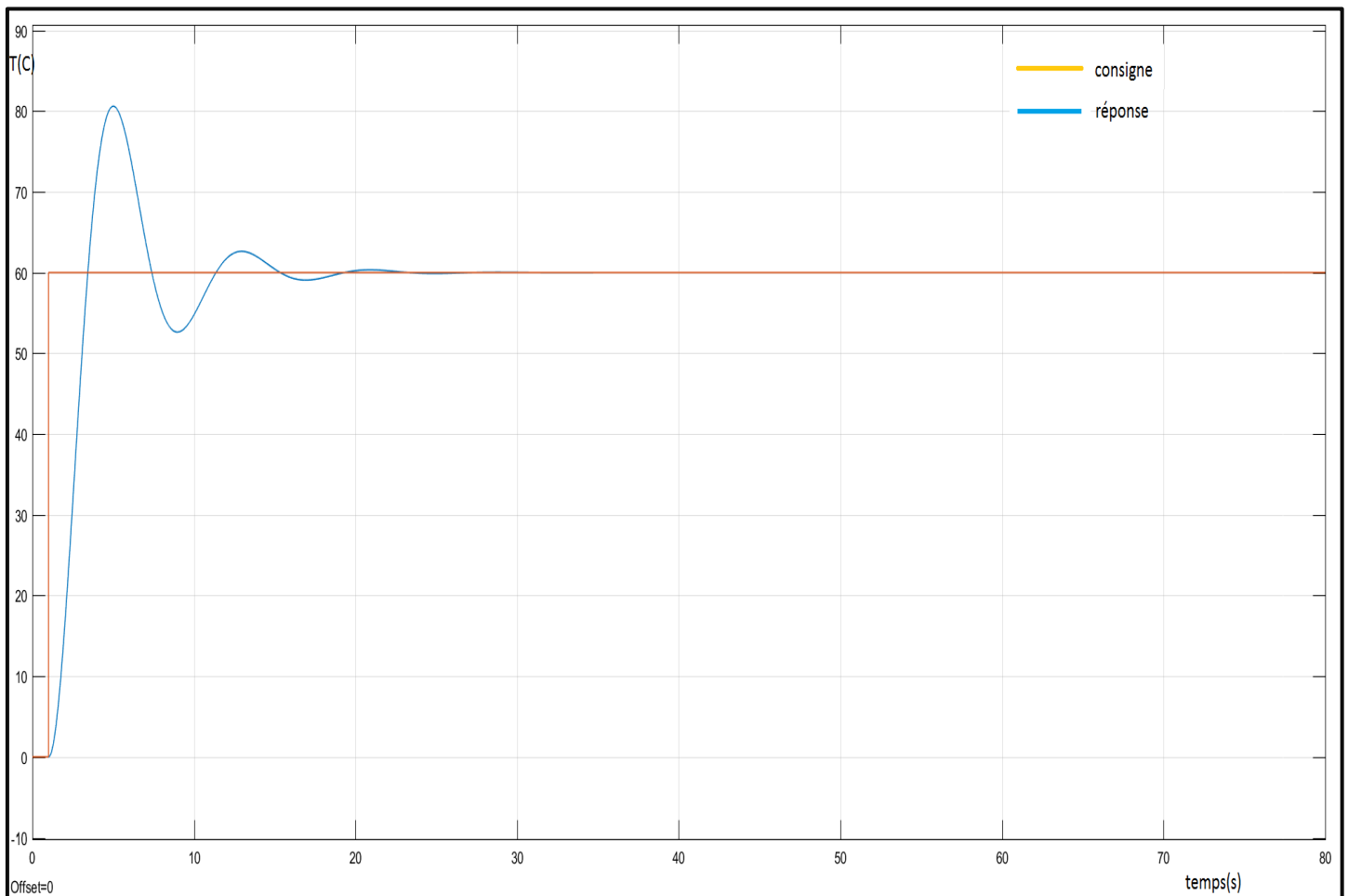


Figure 22:Réponse du système en utilisant “la méthode de Ziegler-Nichols ”

4. Régulation de l'appoint :

Une installation de chauffe-eau collectif par énergie solaire nécessite l'emploi d'une énergie d'appoint permettant un fonctionnement continu dans toutes les conditions, en particulier dans le cas d'un déficit énergétique solaire. Afin de combler ce manque, un chauffage solaire d'appoint est rajouté au système solaire. Parmi les énergies d'appoint les plus utilisées on cite l'énergie électrique. Cette dernière fonctionne grâce à une résistance placée dans le ballon.

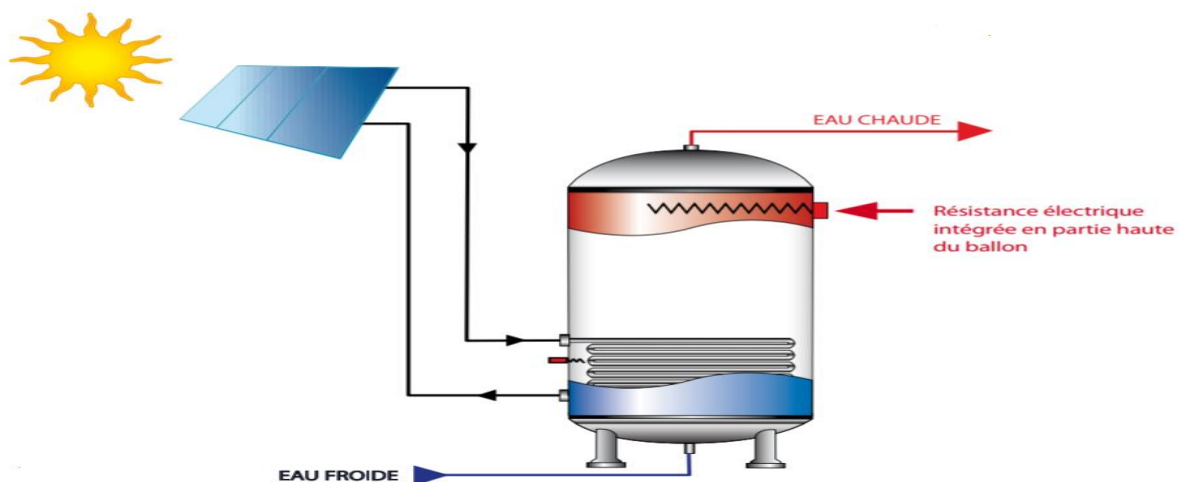


Figure 23 : Appoint intégré électrique

4.1. Description du système :

▪ Résistance d'appoint :

Il s'agit d'une résistance électrique, généralement de 1.4 à 3 kW. Elle doit toujours être montée avec un thermostat, qui gère la mise en marche ou l'arrêt de la résistance, et comporte aussi un système de sécurité thermique.



Figure 24 : Exemple d'une résistance d'appoint

4.2. Contrôle de l'appoint électrique :

Généralement, la résistance se branche directement sur le tableau électrique, c'est le thermostat qui la 'gère'.

Il est intéressant de mettre en place une minuterie qui enclenche l'alimentation de l'appoint entre 17 et 24 h par exemple : dès que le soleil tombe, on peut assurer le complément s'il est nécessaire. C'est utile en particulier si le ballon est un peu juste par rapport aux besoins et aux heures d'utilisation. Cela permet surtout de garder une priorité solaire en été : inutile de laisser la résistance travailler dans la journée alors que le soleil va faire le travail. C'est juste s'il en manque qu'on commence l'appoint, vers 17 heures, quand le soleil a fini d'être efficace et généralement avant qu'on commence à utiliser l'eau chaude ' du soir '. En heure creuse, la résistance est autorisée à fonctionner si la température T3 en haut du ballon est inférieure à la consigne demandée (60°C par exemple) et si le circulateur solaire n'est pas en fonctionnement.

4.3. Les résultats expérimentaux [8] :

Les graphes des figures 25 et 26 montrent la nécessité d'utiliser l'appoint électrique pour le chauffe-eau solaire pour une journée nuageuse et même pour une journée ensoleillée surtout le matin.

En général, le fonctionnement de l'installation solaire couplée à l'énergie d'appoint est tracé dans un graphe (Fig. 27) sur lequel on distingue trois phases :

- ✚ La première phase concerne le début de la journée où les apports solaires sont insuffisants pour réchauffer l'eau à une température qui satisfait le besoin réel en eau chaude donc la résistance est enclenchée.
- ✚ La deuxième phase commence au moment où la température de l'eau dans la cuve de stockage augmentant avec les apports solaires, le régulateur intervient pour déclencher la résistance électrique, en respectant la température de consigne qui est de 50°C dans notre cas.
- ✚ La dernière partie de la journée, la température de l'eau diminue avec la fin de l'ensoleillement et le régulateur intervient pour enclencher la résistance électrique.

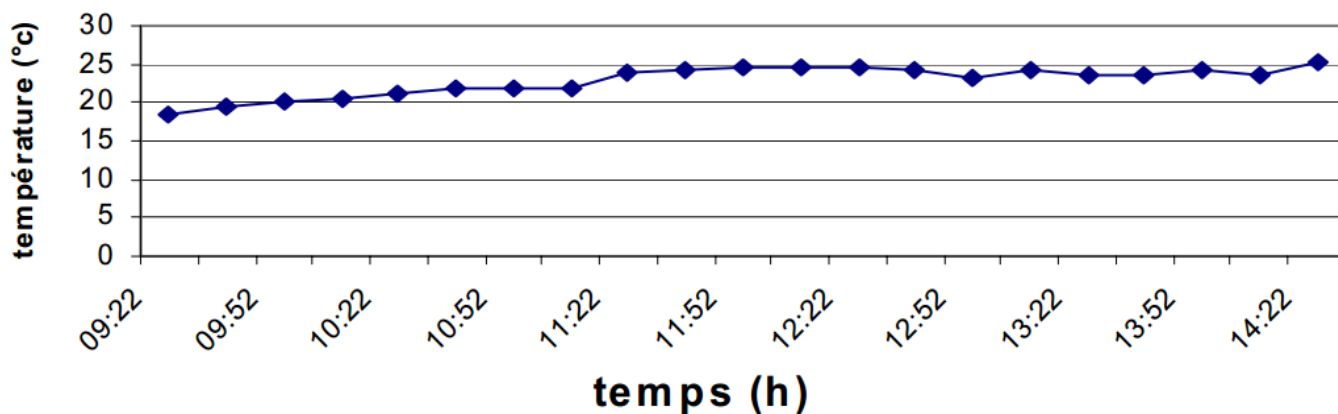


Figure 25 : Fonctionnement du chauffe-eau sans appoint (journée nuageuse).

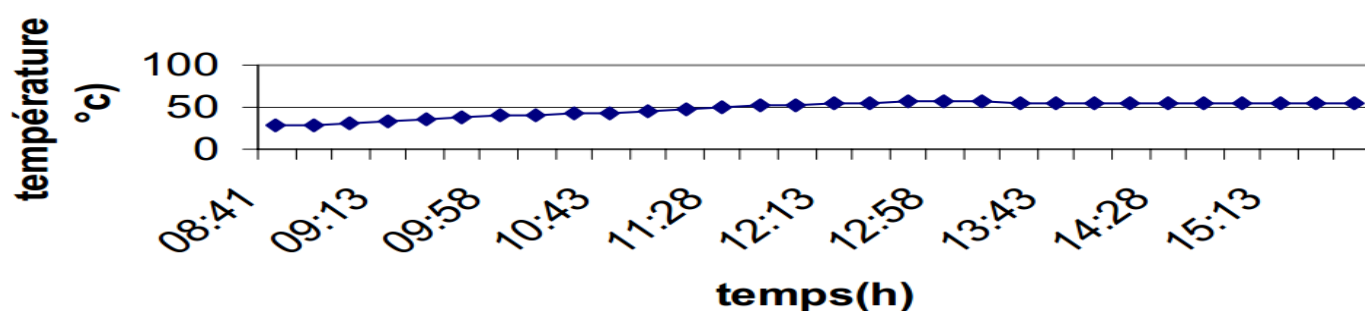


Figure 26 : Fonctionnement du chauffe-eau (journée ensoleillée).

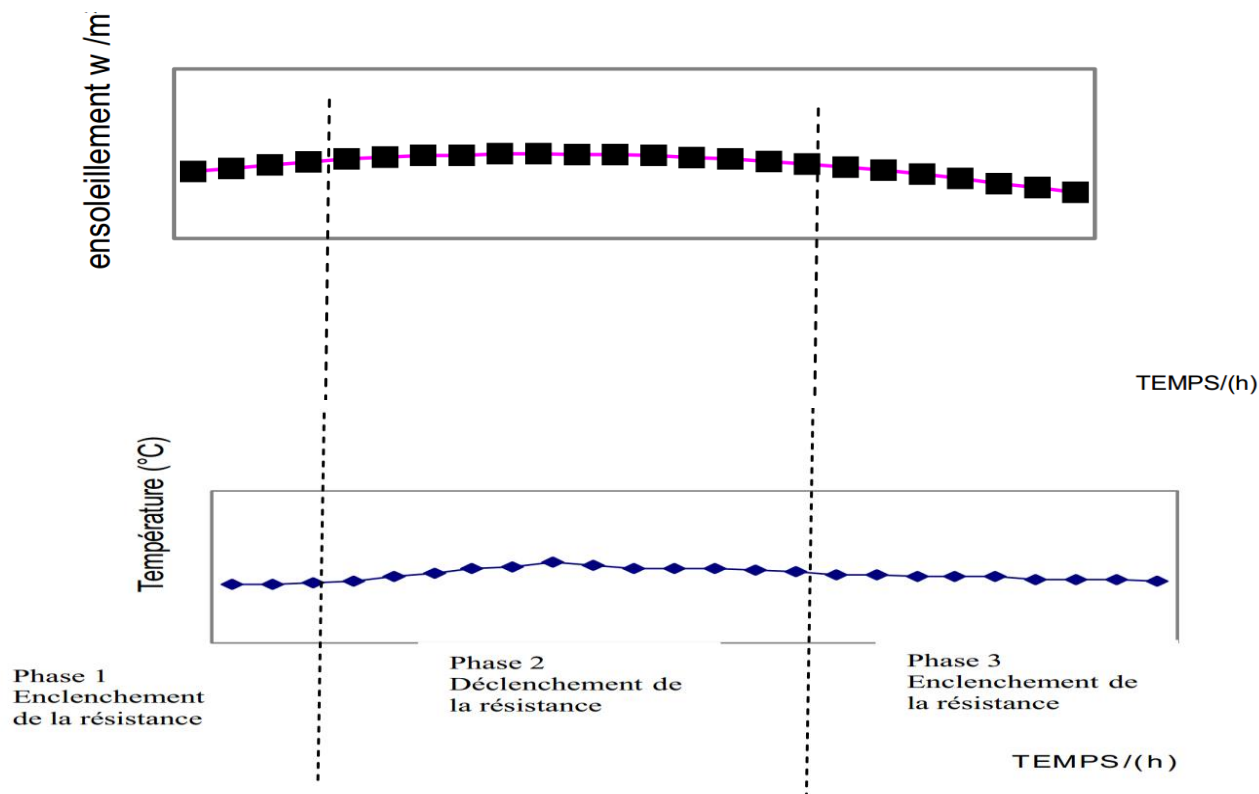


Figure 27 : Fonctionnement de l'installation couplée à l'énergie d'appoint

5. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, Le suivi expérimental du système à montrer que l'appoint électrique intervient juste pour compléter l'apport solaire à une température nécessaire pour le besoin en eau chaude. Donc on profite de l'énergie solaire qui est gratuite au maximum.

Nous sommes enclins à relever que la régulation différentielle sera la solution la plus simple à réaliser ainsi que les régulateurs solaires qui existent déjà au marché sont aussi baser sur le principe de différentiel, dans le chapitre qui suit on va présenter la solution proposée celle de la réalisation d'un régulateur différentiel a l'aide de la carte programmable Arduino uno.

Chapitre III : RÉALISATION D'UN RÉGULATEUR DIFFÉRENTIEL

1. Introduction :

Après avoir donné dans le chapitre précédent une description théorique sur les règles de régulation, nous abordons dans ce chapitre le dernier volet de ce rapport, qui a pour objectif d'exposer la phase de réalisation d'un régulateur différentiel. Nous présenterons, en premier lieu, les différents composants utilisés dans la réalisation du régulateur. Ensuite, nous présentons les étapes de la simulation sous ISIS.

2. Partie matérielle :

2.1. Choix de la carte programmable :

Il y a de nombreuses cartes électroniques qui possèdent des plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. Parmi ces outils, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs tout en offrant plusieurs avantages :

- ❖ **Pas cher** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plateformes.
- ❖ **Multi-plateforme** : Le logiciel Arduino, écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- ❖ **Un environnement de programmation simple** : L'environnement de programmation Arduino est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- ❖ **Logiciel Open Source et extensible** : Le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
- ❖ **Le langage** peut être aussi étendu à l'aide de bibliothèques C++, et les personnes qui veulent comprendre les détails techniques peuvent reconstruire le passage du langage Arduino au langage C pour microcontrôleur AVR sur lequel il est basé.
- ❖ **Matériel Open source et extensible** : Les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, etc. Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les

complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dans le but de comprendre comment elle fonctionne et pour économiser de l'argent. Pour ces raisons on a mis notre choix sur l'Arduino et plus précisément sur l'Arduino Uno.

2.2. Carte ARDUINO :

Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre mais dont certains composants sur la carte, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas en licence libre) sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme le contrôle des appareils domestiques, éclairage, chauffage, le pilotage d'un rob

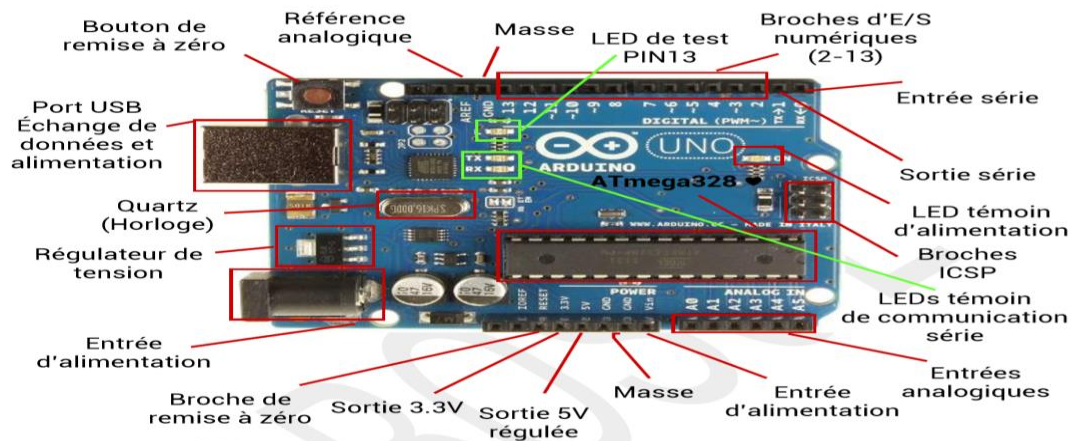


Figure 28 : Schéma synoptique de la carte Arduino Uno

2.3. Capteur de température DS18B20 :

Pour mesurer une température on peut utiliser différents types de capteurs :

- Un capteur analogique qui fournit une valeur (résistance/courant/tension proportionnelle à la température de la sonde)
- Un capteur numérique qui fournit directement la mesure sous forme numérique.

Le capteur analogique n'est pas directement utilisable sur l'Arduino car il délivre une tension/un courant analogique et nécessite la mise en œuvre d'une carte de mesure avec convertisseur analogique/numérique (CAN). C'est la raison pour laquelle on n'a pas utilisé les capteurs de type PT1000. Parmi les capteurs numériques, une famille est particulièrement adaptée pour l'Arduino, c'est la série 1-wire (utilisant un seul fil pour transmettre) dont le

thermomètre numérique DS18B20 qui fournit des mesures de température en degrés Celsius avec une valeur codée de 9 à 12 bits. Sa gamme de mesure s'étend de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.



Figure 29 : Thermomètre numérique DS18B20

2.4. Les afficheurs LCD :

Le LCD " Liquid Crystal Display" est un écran à cristaux liquides. Ses principales caractéristiques sont sa faible consommation et son bas coût. C'est pourquoi, les LCD sont très utilisés dans différents domaines (montres, tableau de bord des voitures, calculatrices, etc). Les écrans LCD sont aussi sous des formes plus complexes telles que la plupart des écrans d'ordinateur ainsi que les téléviseurs à écran plat.

Pour notre cas on va utiliser un LCD pour afficher l'heure et la température de l'eau en haut du ballon

Remarque : Le type de notre écran LCD est (16*2) Caractères, est représenté sur la fig28.



Figure 30 : Afficheur LCD 16x2, affichage noir sur fond vert

2.5. Module de relais :

Un relais est un organe électrique permettant la commutation de liaisons électriques. Il est chargé de transmettre un ordre de la partie commande à la partie puissance d'un appareil électrique et permet, entre autres, un isolement galvanique entre les deux parties. Le relais est donc utile pour effectuer une commande de puissance de type tout ou rien.

Nous avons choisi un module de relais à 2 canaux car nous avons besoin de contrôler juste l'alimentation de la pompe et l'appoint.

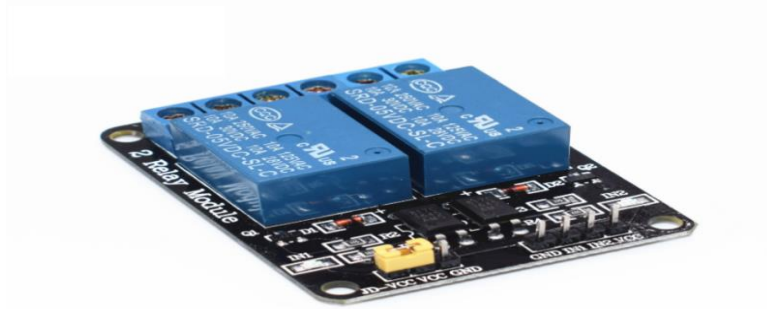


Figure 31 : Relais a deux canaux

2.6. Module L298 :

Le module L298N peut être utilisé pour piloter deux moteurs à courant continu (CC) jusqu'à 2A chacun, avec une tension entre 5 et 35 V DC. Il fonctionne avec une interface de commande TTL 5V (donc compatible avec Arduino ou avec de nombreux autres microcontrôleurs en basse tension).

Il comporte deux ponts en H pour commuter les courants (2A par pont en crête, 20W maxi). Ce module permet de faire varier la vitesse de rotation (en modulation PWM) et d'inverser le sens de rotation des moteurs. Pour nous, il sera très utile si on veut changer la vitesse de rotation de la pompe (cf. ch II).

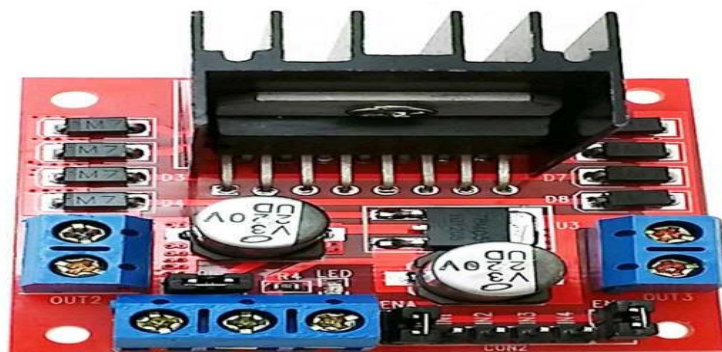


Figure 32 : Module L298

2.7. Alimentation 12V pour Arduino :

Le bloc secteur idéal pour alimenter la carte Arduino via le connecteur DC Power en 12V.



Figure 33 : ALIMENTATION ARDUINO 12V 1,25A JACK 2,1MM

2.8. Le module DS1307 :

Le module DS1307 de Maxim Integrated est une horloge temps réel (aussi appelé "RTC" pour "Real Time Clock"). C'est une horloge numérique autonome capable de gérer l'heure (heures, minutes, secondes) et la date (jours, mois, année) tout en s'occupant des mois de 30 ou 31 jours, des années bissextiles, etc. Le calendrier intégré dans le module DS1307 est valable de l'an 2000 à l'an 2100.

L'utilité de ce module c'est qu'il va nous aider dans la commande de l'appoint électrique vue que ce dernier ne sera actif que dans une plage horaire que nous définirons.

N.B : Le module dispose de tout le nécessaire pour garder en mémoire l'heure en cas de coupure d'alimentation grâce à une batterie externe. Une simple pile bouton permet de garder l'heure et la date à jour durant plusieurs années sans alimentation.

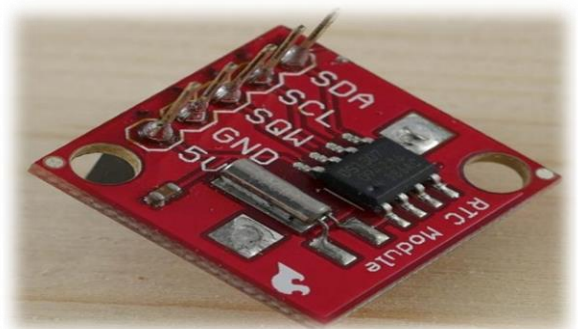


Figure 34 : DS1307 de Maxim Integrated

2.9. Etude économique de la solution adaptée :

Une étude économique est considérée comme une partie indispensable dans la réalisation de tout projet, dans la mesure où elle permet de donner une estimation budgétaire du projet. Le tableau ci-dessous donne l'investissement nécessaire pour la réalisation du régulateur ainsi que les références de chaque composant choisie.

Tableau 5 : liste des composant électroniques et leur prix

NOM DU COMPOSANT	REFERENCE	PRIX
Arduino	Uno	150 DH
LCD 16*2	LM016L	80 DH
Trois sondes de Température	DS18B20	120 DH
Module Relais	Deux Canaux 5 V 10A	40 DH
Alimentation Arduino	ALIM-ARD-12V	45 DH
Fils et maquettes	Breadboard + Fils + Résistances	50 DH
Total		485 DH

3. Partie logicielle :

Cette partie est dédiée à la représentation des plateformes informatiques utilisées.

3.1.1. Plateforme de programmation Arduino :



L'interface de l'IDE Arduino offre une interface minimale et épurée pour développer un programme sur les cartes Arduino. Elle est dotée d'un éditeur de code avec coloration syntaxique et d'une barre d'outils rapide. Ce sont les deux éléments les plus importants de l'interface. On retrouve aussi une barre de menus, plus classique, qui est utilisée pour accéder aux fonctions avancées de l'IDE et une console affichant les résultats de la compilation du code source, des opérations sur la carte, etc.

Le langage Arduino est inspiré de plusieurs langages. On retrouve notamment des similarités avec le

C, le C++, le Java et le Processing. Le langage impose une structure particulière typique de l'informatique embarquée.

3.1.2. Description du code utilisé :

Le code Arduino que on a utilisé comporte deux parties :

La première partie consiste à l'acquisition des températures (haut/bas du ballon et panneaux solaire) par la fonction gettemp, cette dernière permet de décoder l'information binaire envoyée par le capteur DS18B20 a une valeur de température en degrés Celsius ensuite on a programmé la fonction Diff qui calcule la différence de température afin de la comparer avec les seuils définie (DA et DD).

Dans la 2ème partie on a effectué la commande de la pompe et de l'appoint selon les principes suivants :

- * Si la différence de température ΔT est supérieure à DD et que la température du haut du ballon TH est inférieure à 55 on enclanche la pompe.
- * Si ΔT est inférieure à DA ou TH est supérieure a 55 on déclenche la pompe.
- * Si la pompe est on arrêt et TH<55 pendant la fin du journée (heure 17h), l'appoint électrique est enclenché.
- * Si la pompe est mise on marche ou bien si on TH>55 l'appoint électrique est déclenché.

3.1.3. La réalisation sous « PROTEUS Isis » :

Proteus est un outil logiciel permettant la conception électronique assistée par ordinateur éditée par la société Labcenter Electronics. Proteus est composé de deux logiciels principaux : ISIS, permettant, entre autres, la création de schémas et la simulation électrique, et ARES, dédié à la création de circuits imprimés. Grâce à des librairies additionnels, ISIS est également capable de simuler le comportement d'un Arduino et son interaction avec les composants qui l'entourent.

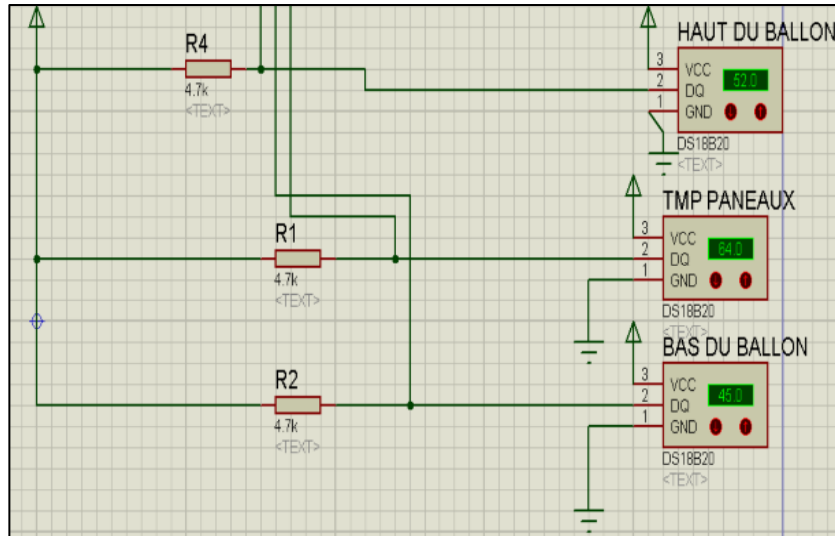


Figure 35 : Icone Isis

i. Déroulement de la simulation :

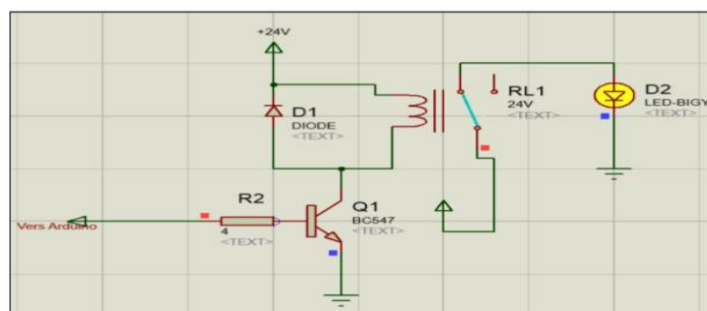
Tout d'abord, il est nécessaire de présenter chaque partie indépendante du système global :

a. Capteur Température DS18B20 en série avec résistance 4.7 Ω :

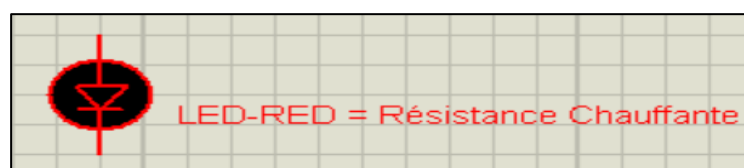


b. Interface commande puissance :

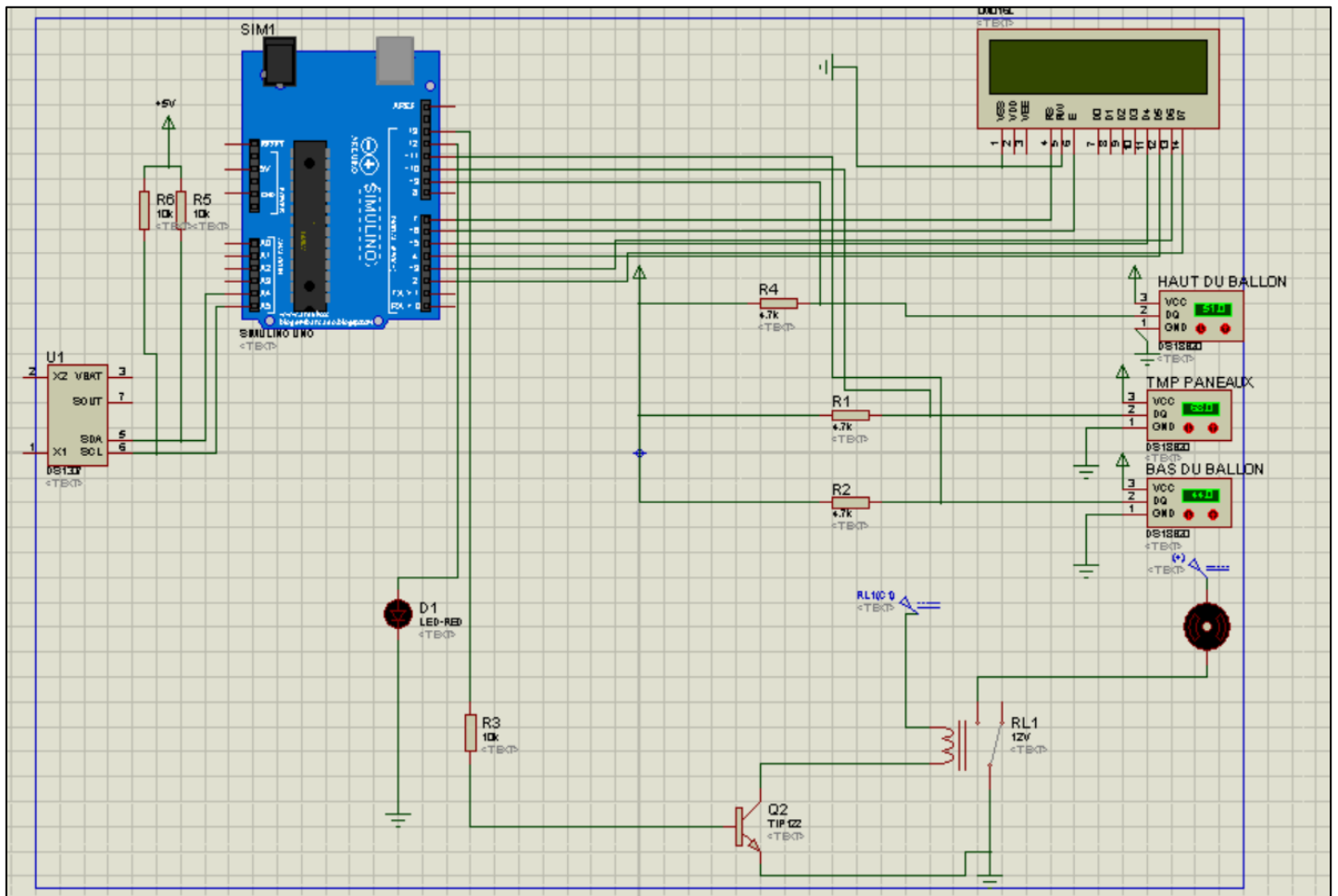
Pour schématiser le relais sur le logiciel de simulation ISIS, on le remplace par un bloc transistor. Sur le schéma donné ci-dessous, le transistor Q1 est l'élément de commande qui commute le courant dans la bobine du relais.



c. L'appoint électrique est équivalent à une LED rouge qui s'allume quand c'est nécessaire (vue que le simulateur ISIS n'offre pas une résistance chauffante dans sa bibliothèque)

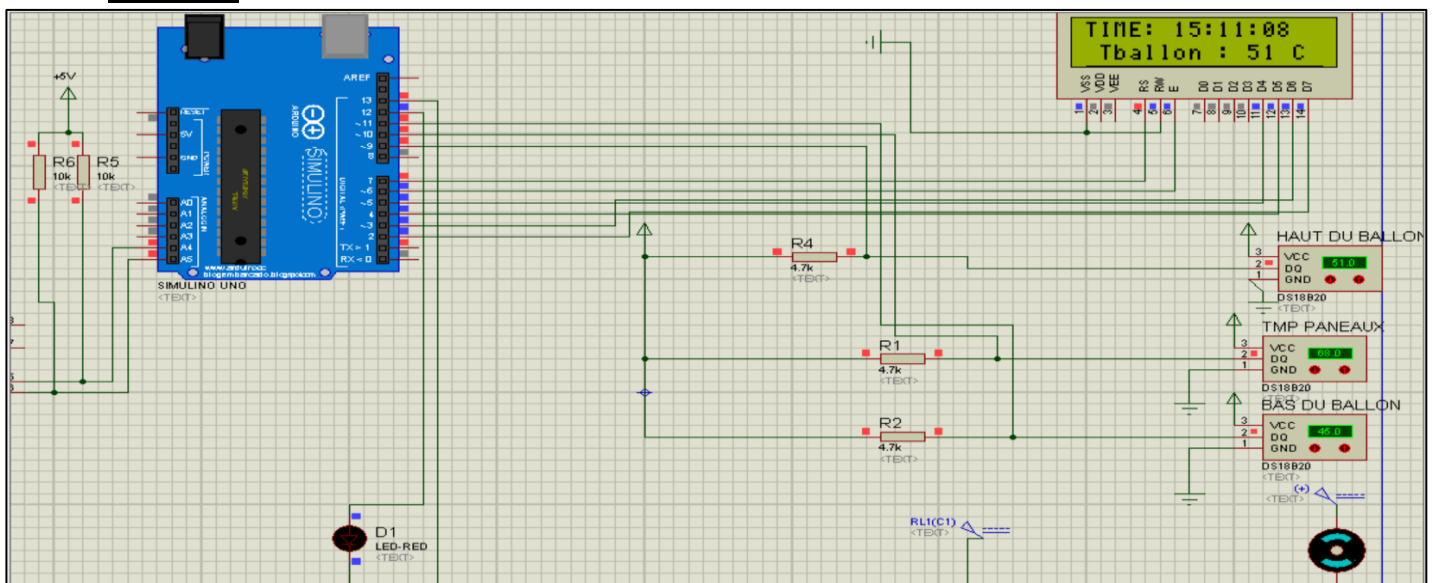


d. Voici le schéma du montage complet

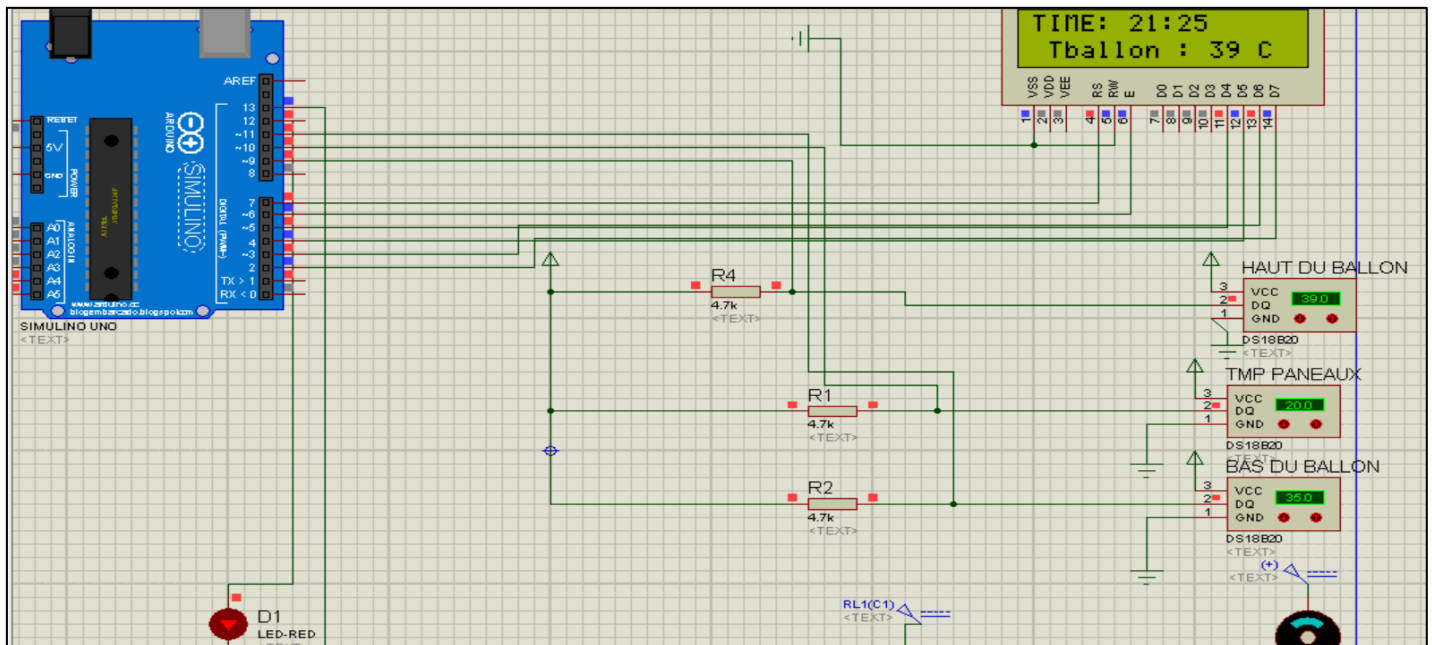


ii. Tests effectués :

Test 01 :



- La température du panneau solaire est 68°C et la température en bas du ballon est : 45°C donc la différence entre les deux est supérieure aux gradients de température de démarrage ce qui entraîne l'activation du moteur.

Test 02 :

- Au soir par exemple, la température des panneaux solaire baisse et devient insuffisante pour chauffer l'eau contenue dans le ballon, donc on active l'appoint électrique qui va apporter le complément de chaleur nécessaire pour atteindre la température de consigne (55°C).

4. Conclusion :

Dans le présent chapitre, on a présenté la démarche de réalisation d'un régulateur différentiel. En particulier, le coût est très faible par rapport aux régulateurs commercialisés. Les simulations sous PROTEUS Isis montrent que le fonctionnement de notre système est correct.

Conclusion générale

L'étude réalisée dans le présent travail concerne le régulateur solaire thermique qui est une partie primordiale des circuits thermiques des chauffe-eaux solaires modernes. En effet, un système de régulation est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du chauffe-eau solaire à circulation forcé.

On s'est intéressé, en premier lieu, au régulateur différentiel qui est le régulateur le plus simple et le plus utilisé. Après avoir présenté les principes de base de la régulation différentielle, on s'est intéressé à l'implémentation de cette technique sur un système Arduino en utilisant des sondes de température adaptées. Les simulations de notre système sur Proteus Isis ont montré le bon fonctionnement de notre système à faible coût.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'élaboration d'un contrôleur PID plus élaboré. Nous avons utilisé des résultats expérimentaux fournis par Francis Bielsa [7], dans le cas d'un système à circulation forcée avec eau glycolée, pour l'identification de la fonction de transfert du chauffe-eau solaire. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de Strejc-Davoust.

Les performances du régulateur PID ont été ensuite évaluées par simulation sous Matlab/Simulink. Nous avons présenté les résultats obtenus en utilisant deux méthodes de réglages des paramètres du PID : la méthode dite simple et la méthode de Ziegler-Nichols. Les résultats obtenus sont encourageants.

Comme perspectives de notre travail, nous envisageons l'approfondissement du travail sur le régulateur PID et l'exploration d'autres possibilités comme la régulation à l'aide de la logique floue qui est aussi largement citée dans la littérature.

Annexe: Code Arduino

```
#include <Wire.h>

#include "RTCLib.h"

#include <math.h>

#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(7,6,5,4,3,2);

#define ONE_WIRE_BUS 10

#define ONE_WIRE_BUS2 11

#define ONE_WIRE_BUS3 9

RTC_DS1307 RTC;

float DD=6;

float DA=2;

int moteur=13;

int LED=12; // a la place de resistance

void OW_Set(unsigned char mode){
    if (mode){
        pinMode(ONE_WIRE_BUS, OUTPUT);
        digitalWrite(ONE_WIRE_BUS, LOW);
    }
    else
        pinMode(ONE_WIRE_BUS, INPUT);
}

void OW_Set2(unsigned char mode){
    if (mode){
        pinMode(ONE_WIRE_BUS2, OUTPUT);
        digitalWrite(ONE_WIRE_BUS2, LOW);
    }
    else
        pinMode(ONE_WIRE_BUS2, INPUT);
}
```

```
void OW_Set3(unsigned char mode){
    if (mode){
        pinMode(ONE_WIRE_BUS3, OUTPUT);
        digitalWrite(ONE_WIRE_BUS3, LOW);
    }
    else
        pinMode(ONE_WIRE_BUS3, INPUT);
}

unsigned char OW_Reset(void){
    noInterrupts();
    OW_Set(1);
    delayMicroseconds(480);
    OW_Set(0);
    delayMicroseconds(60);
    unsigned char status = digitalRead(ONE_WIRE_BUS);
    delayMicroseconds(420);
    interrupts();
    return !status;
}

unsigned char OW_Reset2(void){
    noInterrupts();
    OW_Set2(1);
    delayMicroseconds(480);
    OW_Set2(0);
    delayMicroseconds(60);
    unsigned char status = digitalRead(ONE_WIRE_BUS2);
    delayMicroseconds(420);
    interrupts();
    return !status;
}
```

```
unsigned char OW_Reset3(void){
    noInterrupts();
    OW_Set3(1);
    delayMicroseconds(480);
    OW_Set3(0);
    delayMicroseconds(60);
    unsigned char status = digitalRead(ONE_WIRE_BUS3);
    delayMicroseconds(420);
    interrupts();
    return !status;
}

void OW_WriteByte(unsigned char byte){
    noInterrupts();
    for (unsigned char i=0; i<8; i++){
        OW_Set(1);
        delayMicroseconds(1);
        if(bitRead(byte, i)) OW_Set(0);
        delayMicroseconds(60);
        OW_Set(0);
    }
    interrupts();
}

void OW_WriteByte2(unsigned char byte){
    noInterrupts();
    for (unsigned char i=0; i<8; i++){
        OW_Set2(1);
        delayMicroseconds(1);
        if(bitRead(byte, i)) OW_Set2(0);
        delayMicroseconds(60);
        OW_Set2(0);
    }
}
```

```
    }  
    interrupts();  
}  
  
void OW_WriteByte3(unsigned char byte){  
    noInterrupts();  
    for (unsigned char i=0; i<8; i++){  
        OW_Set3(1);  
        delayMicroseconds(1);  
        if(bitRead(byte, i)) OW_Set3(0);  
        delayMicroseconds(60);  
        OW_Set3(0);  
    }  
    interrupts();  
}  
  
unsigned char OW_ReadByte(void){  
    unsigned char n=0;  
    noInterrupts();  
    for (unsigned char i=0; i<8; i++){  
        OW_Set(1);  
        delayMicroseconds(1);  
        OW_Set(0);  
        delayMicroseconds(14);  
        if(digitalRead(ONE_WIRE_BUS)) bitSet(n, i);  
        delayMicroseconds(45);  
    }  
    interrupts();  
    return n;  
}  
  
unsigned char OW_ReadByte2(void){  
    unsigned char n=0;
```

```
noInterrupts();
for (unsigned char i=0; i<8; i++){
    OW_Set2(1);
    delayMicroseconds(1);
    OW_Set2(0);
    delayMicroseconds(14);
    if(digitalRead(ONE_WIRE_BUS2)) bitSet(n, i);
    delayMicroseconds(45);
}
interrupts();
return n;
}

unsigned char OW_ReadByte3(void){
    unsigned char n=0;
    noInterrupts();
    for (unsigned char i=0; i<8; i++){
        OW_Set3(1);
        delayMicroseconds(1);
        OW_Set3(0);
        delayMicroseconds(14);
        if(digitalRead(ONE_WIRE_BUS3)) bitSet(n, i);
        delayMicroseconds(45);
    }
    interrupts();
    return n;
}

//
void setup() {
    pinMode(moteur,OUTPUT);
    pinMode(LED,OUTPUT);
```

```

    lcd.begin(16, 2);
Serial.begin(9600);
    Wire.begin();
    RTC.begin();
}

float delta = 1.0;
float tt = 18.0;
//
float gettemp(){
    if(OW_Reset())
    {
        OW_WriteByte(0xCC); // cmd SKIP_ROM
        OW_WriteByte(0x44); // cmd CONVERT_T
        delay(750);
    }

    if(OW_Reset()){
        OW_WriteByte(0xCC); // cmd SKIP_ROM
        OW_WriteByte(0xBE); // cmd READ_SCRATCHPAD

        unsigned int t = OW_ReadByte() + (OW_ReadByte() << 8);
        unsigned int s = t & 0x8000;
        if (s) t = (t ^ 0xffff) + 1;
        float celsius = float(t)/1.6;
        if (s) celsius = celsius * -1;
        celsius = (float)round(celsius)/10;
        // Return la valeur de la temp en °C
        return celsius;
    }

```

```

}

float gettemp2(){
if(OW_Reset2())
{
    OW_WriteByte2(0xCC); // cmd SKIP_ROM
    OW_WriteByte2(0x44); // cmd CONVERT_T
    delay(750);
}

if(OW_Reset2()){
    OW_WriteByte2(0xCC); // cmd SKIP_ROM
    OW_WriteByte2(0xBE); // cmd READ_SCRATCHPAD

    unsigned int t = OW_ReadByte2() + (OW_ReadByte2() << 8);
    unsigned int s = t & 0x8000;
    if (s) t = (t ^ 0xffff) + 1;
    float celsius = float(t)/1.6;
    if (s) celsius = celsius * -1;
    celsius = (float)round(celsius)/10;
    // Return la valeur de la temp en °C
    return celsius;
}
}

float gettemp3(){
if(OW_Reset3())
{
    OW_WriteByte3(0xCC); // cmd SKIP_ROM
    OW_WriteByte3(0x44); // cmd CONVERT_T
    delay(750);
}
}

```

```

if(OW_Reset3()){
    OW_WriteByte3(0xCC); // cmd SKIP_ROM
    OW_WriteByte3(0xBE); // cmd READ_SCRATCHPAD

    unsigned int t = OW_ReadByte3() + (OW_ReadByte3() << 8);
    unsigned int s = t & 0x8000;

    if (s) t = (t ^ 0xffff) + 1;

    float celsius = float(t)/1.6;
    if (s) celsius = celsius * -1;

    celsius = (float)round(celsius)/10;

    // Return la valeur de la temp en °C
    return celsius;
}
}

```

```

float Diff(float TC,float TB){
    float DT;

    DT=TC-TB;

    return DT;
}

```

```

void loop() {
    DateTime now = RTC.now();

    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("TIME: ");

    lcd.print(now.hour(), DEC);

    lcd.print(":");

    lcd.print(now.minute(), DEC);
}

```

```
float A;
```

```

float B;

float c;

int pompe;

A=gettemp();
B=gettemp2();
c=gettemp3();

lcd.setCursor(1,1);

lcd.print("Tballon : ");

lcd.print(c,0);

lcd.print(" C");

if(Diff(A,B)>DD && c<55)
{
    digitalWrite(moteur,HIGH); //démarrage de la pompe
    pompe=1;
}

if(Diff(A,B)<DA | | c>55)
{
    digitalWrite(moteur,LOW); //l'arrêt de la pompe

    pompe=0;
}

if(pompe==0&&c<55&&now.hour()>17)    // démarrage de la résistance
{
    digitalWrite(LED,HIGH);
}

if(c>=55 | | pompe==1)
{
    digitalWrite(LED,LOW); }} // l'arrêt de la résistance

```

Références :

- [1] :
Présentation sous-titre “Capteur Solaires Thermiques” Publié par Clairene Combes
disponible à : <http://slideplayer.fr/slide/1204536/release/woothee#>
- [2] :
<http://www.chauffe-eau-solaires.net> (consulté le 13/04/2018)
- [3] :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique (consulté le 14/04/2018)
- [4] :
<http://eavr.u-strasbg.fr/~laroche/student/MasterIT-ComMach/ComMach1/node36.html>
(consulté le 30/05/2018)
- [5] :
http://linuxcnc.org/docs/html/motion/pid_theory_fr.html (consulté le 31/05/2018)
- [6] :
<http://www.specialautom.net/synthese-empirique> (consulté le 30/05/2018)
- [7] :
<http://www.solaire-diffusion.fr/solaire-thermique/chauffe-eau-solaire/kits-chauffe-eau-solaires/kit-chauffe-eau-circulation-forcee/exemple-de-fonctionnement-cesi.html>
(Consulté le 31/05/2018)
- [8] :
https://www.researchgate.net/profile/Chouder_Aissa/publication/236109230_Experimentation_du_Systeme_de_Regulation_et_Controlle_Destine_pour_l'Appoint_Electrique_d'un_Chauffe-Eau_Solaire/links/00b49516024c6939b5000000.pdf (consulté le 10/04/2018)
- [9] : FATIHA BOUHIRED, “commande et contrôle d’une installation thermique” PFE de Master, université m’hamed bougara algerie,2004
- [10] : <https://boutique-solaire-diffusion.eu/regulations-solaires/13-steca-tra301pwm.html> (consulté le 20/04/2018)