

# INNOVATION **UTT**® **CRUNCH TIME**

[Zéro Déchet Troyes] – [Héliostat Low-Tech]

[604A]

[GUYOT Maëlle] - [GUZZI Victoria] - [HUANG Chen Yang]

[JORÉ Jérémie] - [THOMAS Tifenn] - [VERRON Marin]

# Plan :

## Introduction

- 1) Étude comparative et choix technologique**
  - a) Différentes solutions technologiques**
  - b) Technologie retenu**
  
- 2) Solution Héliostat**
  - a) Réflexion sur les différents fonctionnement**
  - b) Concept de l'Héliostat**
  - c) Horloge hydraulique**
  
- 3) Étude technique et dimensionnement**
  - a) Fonctionnement du système**
  - b) Les matériaux**
  - c) La simulation**
  
- 4) Dossier de réalisation et estimation des coûts**
  - a) Guide d'assemblage**
  - b) Estimation des coûts**

## Conclusion

## Introduction :

Dans le cadre de l'événement UTT Crunch Time 2026, nous travaillons sur la thématique Action 3R « Réduction des déchets, recyclage et réemploi », pour le compte de l'association Zéro Déchet Troyes. Notre mission : concevoir un héliostat low-tech.

Un héliostat est un ensemble qui utilise des motoréducteurs électriques et des capteurs électroniques pour suivre le soleil et garder une orientation optimale avec ce dernier. Cependant, pour un cuiseur solaire thermique comme le four à tube sous vide ou encore la parabole, il n'y a aucune source d'électricité. Le suivi se fait donc pour l'instant uniquement à la main, ce qui est assez contraignant. L'association nous a mis au défi d'imaginer un système d'orientation « low-tech », soit totalement mécanique, soit avec l'ajout d'un petit panneau photovoltaïque dédié uniquement à la motorisation du système.

Pour notre projet, deux systèmes retiennent particulièrement notre attention : les paraboles et les fours solaires à tube sous vide. Le cahier des charges impose que les mouvements d'orientation se fassent obligatoirement sur l'azimut (d'est en ouest) et idéalement, sur l'élévation, de la ligne d'horizon au zénith. De plus, un alignement de plus de 5 h serait préférable afin de respecter le temps des cuissons solaires.

Pour la suite de notre projet, nous avons décidé d'écarter le modèle de la parabole pour nous concentrer uniquement sur le four solaire à tube sous vide. Ce choix s'explique principalement par des raisons de sécurité : la parabole concentre les rayons en un point focal extérieur, ce qui présente des risques importants de brûlure accidentelle, notamment pour les enfants. À l'inverse, le tube sous vide est beaucoup plus sûr car la chaleur reste confinée. La suite de notre réflexion s'est ensuite appuyée sur la demande principale du cahier des charges : concevoir un mécanisme « low-tech » et purement mécanique.

## 1) Étude comparative et choix technologique :

### a) Différentes solutions technologiques :

Pour appréhender au mieux notre démarche et les choix techniques qui en découlent, il convient de préciser que cette étude se restreint géographiquement au département de l'Aube. Ce choix implique que le dimensionnement de notre mécanisme, et notamment le calcul du débit d'eau, est calibré spécifiquement sur le mouvement et la course apparente du soleil dans le ciel aubois afin de garantir une efficacité optimale lors des journées d'ensoleillement locales.

Afin de répondre au besoin de motorisation autonome et low tech de l'héliostat, notre équipe a exploré et comparé deux concepts de mécanismes distincts avant d'arrêter son choix final. L'idéal est d'avoir un système totalement mécanique, afin d'éviter l'utilisation de moteurs et de panneaux photovoltaïques qui ne seraient pas en adéquation avec l'objectif de l'association pour ces systèmes.

Le tableau ci-dessous résume l'analyse comparative des avantages et inconvénients des deux pistes technologiques initiales :

<b>Solution envisagée</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Solution 1 :</b> <b>Système d'horlogerie</b> <b>(montre à engrenages</b> <b>et ressort)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande précision de suivi mécanique</li> <li>- Système très compact visuellement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception mécanique plus complexe</li> <li>- Coût de fabrication plus élevé</li> <li>- Réparabilité et viabilité low-tech limitées</li> </ul>
<b>Solution 2 :</b> <b>Système à contrepoids</b> <b>d'eau</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution très économique</li> <li>- Conception / Fabrication simples</li> <li>- Facile à mettre en œuvre et à dupliquer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilité à long terme dépendante de l'écoulement</li> <li>- Contrainte de volume d'eau important à gérer (évaporation, etc...)</li> <li>- Faible précision de suivi dans les systèmes non linéaires</li> </ul>

#### Solution 1 :

Cette première idée s'inspire directement du fonctionnement interne d'une montre mécanique traditionnelle. L'énergie nécessaire au mouvement doit être stockée dans un ressort lors du remontage manuel chaque matin. Cette énergie est ensuite libérée de manière très lente et régulière vers l'axe du réflecteur grâce à un train d'engrenages et un système d'échappement ou de balancier.

Bien que cette solution offre une compacité intéressante et une excellente précision et régularité de rotation, elle n'est cependant pas idéale avec notre cahier des charges. En effet, la fabrication d'un train d'engrenages de précision et d'un système de régulation par ressort demande

un savoir-faire et des composants coûteux. De plus, en cas de panne, l'utilisateur final ne pourrait ni effectuer la maintenance nécessaire, ni fabriquer les pièces lui-même, ce qui n'est pas en adéquation avec la philosophie prônée par l'association.

## Solution 2 :

Cette seconde approche utilise la gravité et le principe fondamental de la balance. Elle consiste à équilibrer la structure du réflecteur du four à tube sous vide en installant, d'un côté, un réservoir d'eau et, de l'autre, un contrepoids fixe. Au départ, le réservoir d'eau est plein, ce qui fait basculer le réflecteur dans sa position de départ. Lorsque l'eau s'écoule goutte à goutte à débit constant, le réservoir devient de plus en plus léger. C'est donc le contrepoids qui prend le dessus sur le réservoir d'eau, ce qui fait pivoter l'ensemble de manière fluide dans l'objectif de suivre la trajectoire du soleil.

Même si ce système demande d'anticiper le volume requis et offre une précision légèrement moindre par rapport à la première solution, il se distingue cependant par son coût plus faible, son absence totale de pièces d'usure complexes et sa fabrication accessible à partir de matériaux de récupération.

### b) Technologie retenu :

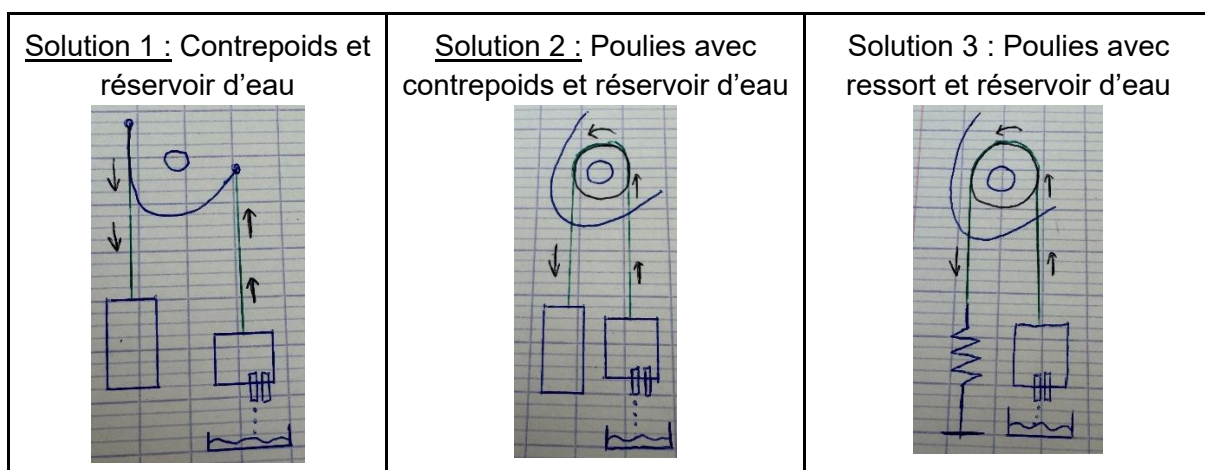
En prenant en compte les exigences de la thématique Action 3R et l'objectif de concevoir un système économiquement accessible et potentiellement diffusable sous forme de kit, notre équipe a validé à l'unanimité la deuxième solution (Contrepoids d'eau).

Cette solution nous permet donc d'éliminer les liaisons complexes par engrenages et les composants de précision de la première solution. De plus, nous limitons la fabrication à un assemblage simplifié. Ce choix garantit la parfaite adéquation entre notre prototype et les valeurs low-tech de l'association Zéro Déchet Troyes.

## 2) Solution Héliostat :

### a) Réflexion sur les différents fonctionnement :

Une fois la décision prise d'utiliser un mécanisme basé sur la variation d'une masse d'eau (clepsydre), notre équipe a brainstormé sur trois configurations mécaniques différentes :



Pour la première solution, le principe est de supprimer tous les intermédiaires mécaniques (poulies, ressorts, etc.). Le réservoir d'eau et le contrepoids sont directement fixés de part et d'autre de la structure du réflecteur. Comme pour la deuxième solution, l'accélération de la vitesse de rotation augmente légèrement au fil de la course, même si cela reste minime.

Pour la deuxième solution, l'architecture est similaire, mais le contrepoids et le réservoir d'eau sont reliés par un câble enroulé autour d'une poulie centrale fixée sur l'axe du réflecteur.

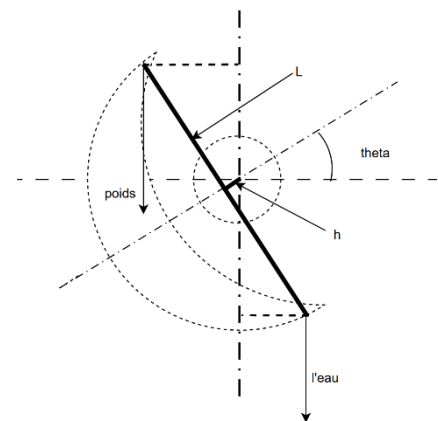
Pour la troisième solution, l'écoulement de l'eau permet à un ressort de se détendre, ce qui entraîne la rotation de l'axe central via une poulie. Ici, l'utilisation du ressort permet de canaliser l'accélération de la vitesse de rotation, résolvant ainsi le problème cité ci-dessus. C'est donc théoriquement la solution la plus précise de notre brainstorming.

Après avoir analysé en détail les avantages et les inconvénients de chaque piste par rapport au contexte et au cahier des charges « Low-tech », nous avons validé la Solution 1. Certes, l'option avec ressort offre une meilleure régularité mécanique en compensant l'accélération naturelle du système lors de la bascule. Cependant, cette quête de précision absolue n'est pas le critère le plus important dans notre cas : le tube de verre sous vide capte les rayons sur une surface bien plus large qu'une simple parabole, ce qui tolère de légers écarts d'orientation sans pour autant faire chuter la température de cuisson. En choisissant la Solution 1, nous privilégions la simplicité, la robustesse et l'impact réel pour l'association Zéro Déchet Troyes.

## b) Concept de l'Héliostat :

Afin de répondre à la problématique qui nous est posée pour ce Crunch 2026, nous nous sommes basés sur un système développé par SunSaluter. Ce dernier est un héliostat passif low-tech conçu pour assurer le suivi du soleil sans aucun composant électronique, sans capteur et sans alimentation électrique externe. Son objectif est de faire pivoter lentement un panneau solaire afin de suivre le déplacement apparent du soleil au cours de la journée et ainsi maximiser le rendement énergétique du système. Initialement créé pour être utilisé avec des panneaux solaires, notre projet repose sur l'adaptation de ce système ingénieux au cas du four solaire à tube sous vide.

Le principe de base de notre système à contrepoids d'eau est conçu comme suit : du point de vue mécanique, ce système est un levier en équilibre dont le centre d'application des forces se trouve en dessous de l'axe de rotation. D'un côté, un contrepoids est suspendu et de l'eau de l'autre côté. En raison de la diminution de l'eau d'un côté, le bras de levier tend à s'allonger, ce qui fait pencher le levier. On établit ainsi un système de contrôle de l'angle du réflecteur par la perte d'eau.



Le principe de ce système est donné par la formule ci-contre :

Avec :

*h* : distance entre le centre d'effort et l'axe de rotation.

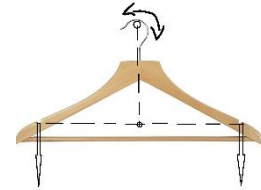
*L* : distance entre les points de suspension des deux côtés.

*c* : rapport des masses de chaque côté.

*θ* : angle entre les rayons solaires parallèles et le sol, également l'angle entre le miroir et le sol ; il est compris entre 0 et 180°.

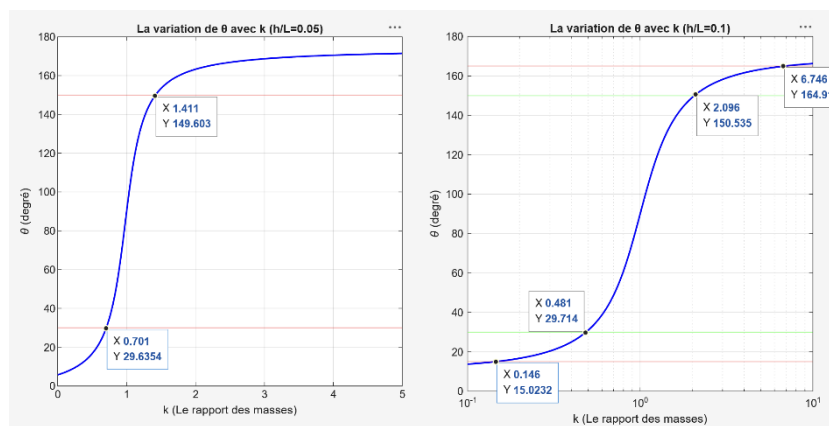
$$\theta = \arctan\left(\frac{2h}{L} \cdot \frac{1-c}{1+c}\right)$$

**Analyse du système à levier et amélioration :** Au début du projet, nous avons utilisé un levier dont le centre d'effort coïncidait avec l'axe de rotation. Cependant, après une simple analyse des forces, nous avons constaté que dès que les masses des deux côtés sont inégales, le levier subit une accélération qui le fait osciller jusqu'à s'arrêter à la position verticale. Nous avons conclu qu'il fallait adopter une structure semblable à un cintre (voir figure), c'est-à-dire un levier dont le centre d'effort est situé en dessous du point de rotation, comme décrit précédemment.



La formule ci-dessus contient une fonction arctan, ce qui rend non linéaire la relation entre la variation de la masse d'eau et la variation de l'angle du système. Il est donc nécessaire d'effectuer une analyse numérique pour déterminer l'intervalle utile.

L'analyse numérique sous Matlab est la suivante : on observe que lorsque la distance verticale  $h$  vaut 0,05 fois la longueur totale du levier, la courbe dans l'intervalle de travail  $[30^\circ, 150^\circ]$  est quasi linéaire. Dans ce cas, la durée de fonctionnement du système est limitée à 8 heures.

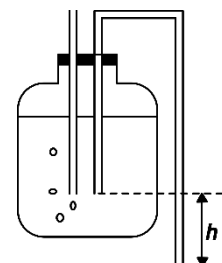


Nous remarquons également que, dans ces conditions, pour réaliser un réglage d'angle de  $30^\circ$  à  $150^\circ$ , le rapport des contrepoids des deux côtés se situe justement entre 0,7 et 1,3.

### c) Horloge hydraulique :

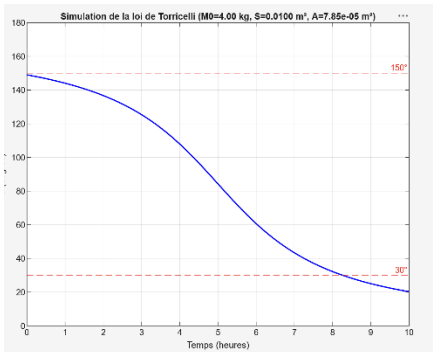
Pour la partie horloge hydraulique du système à contrepoids d'eau, la vitesse de fuite dépend de la pression au niveau de l'orifice d'écoulement, et donc de la hauteur de l'eau. Ainsi, sans conception particulière, la vitesse de fuite n'est pas constante : elle diminue progressivement au cours du temps selon la loi de Torricelli. Cela va à l'encontre de notre besoin de suivre le soleil.

Il est donc nécessaire de concevoir un dispositif à pression constante pour la fuite. Nous utilisons un flacon de Mariotte comme horloge hydraulique (image ci-contre). Pour le flacon de Mariotte, les deux tubes doivent avoir une différence de hauteur afin de maintenir une différence de pression constante entre le tube d'entrée d'air et le tube de sortie d'eau. On obtient ainsi une vitesse de fuite constante.



Afin de réaliser une bouteille de Mariotte simple à déployer, nous pouvons utiliser une bouteille en plastique associée à un bouchon spécial. Ce bouchon doit comporter deux tubes d'étanchéité, l'un long et l'un court, ou bien un orifice de sortie d'eau et un tube long. Le tube long constitue le conduit d'entrée d'air, tandis que le tube court (ou l'orifice) sert de sortie d'eau. Les tubes ont un diamètre standard de 1 mm ; d'autres matériaux ou méthodes de fabrication sont également possibles, tels que le perçage ou le moulage par injection. Dans cette configuration, la distance entre

l'extrémité interne du tube d'entrée d'air (à l'intérieur de la bouteille) et l'orifice de sortie d'eau doit être de 1,73 cm (nous utilisons ici une masse de 2 kg pour le contrepoids et un réservoir d'eau de plus de 3 L, avec un volume initial de 2,6 L et un volume final de 1,4 L).



Comme illustré dans la figure ci-contre, si l'on n'utilise pas de bouteille de Mariotte, des résultats relativement acceptables peuvent également être obtenus dans des conditions spécifiques. On observe qu'ici, la distance verticale  $h$  du levier vaut 0,1 fois la longueur totale du levier et les paramètres du système à eau sont les suivants : un réservoir cylindrique d'une section transversale de  $0,01 \text{ m}^2$ , percé à sa base d'un orifice de 10 mm de diamètre, contenant 4 kg d'eau, avec un contrepoids de 2 kg. Ce dispositif permet un suivi solaire couvrant une plage de 30 à 150 degrés pendant 8 heures.

Ce tableau, récupéré sur le site de Sunsaluter, nous indique le débit du système sans flacon de Mariotte. On remarque que ce débit reste constant tout au long du cycle d'écoulement. Ce cycle d'écoulement nous permettrait de compléter 2 cycles de cuisson en une seule journée. Le débit à respecter pour une rotation complète est d'environ 150 mL toutes les 15 minutes. Ce débit peut facilement se régler avec la valve installée à la base du réservoir (tube le plus long de la bouteille de Mariotte).

On remarque également que le point d'équilibre, obtenu quand 2 L d'eau se sont échappés du contenant, arrive après 4 h et 19 minutes, ce qui correspond environ au demi-cycle de la rotation. Notre configuration est donc quasi optimale.

Remaining Water (mL)	Dripped Water (mL)	Total Time
4000	0	0:00
3900	100	0:08
3800	200	0:20
3700	300	0:32
3600	400	0:44
3500	500	0:56
3400	600	1:09
3300	700	1:22
3200	800	1:35
3100	900	1:48
3000	1000	2:01
2900	1100	2:14
2800	1200	2:27
2700	1300	2:40
2600	1400	2:53
2500	1500	3:07
2400	1600	3:21
2300	1700	3:35
2200	1800	3:49
2100	1900	4:04

Remaining Water (mL)	Dripped Water (mL)	Total Time
2000	2000	4:19
1900	2100	4:34
1800	2200	4:49
1700	2300	5:04
1600	2400	5:19
1500	2500	5:34
1400	2600	5:49
1300	2700	6:04
1200	2800	6:19
1100	2900	6:34
1000	3000	6:49
900	3100	7:04
800	3200	7:20
700	3300	7:36
600	3400	7:52
500	3500	8:08
400	3600	8:25
300	3700	8:42
200	3800	9:00
100	3900	9:18
0	4000	9:37

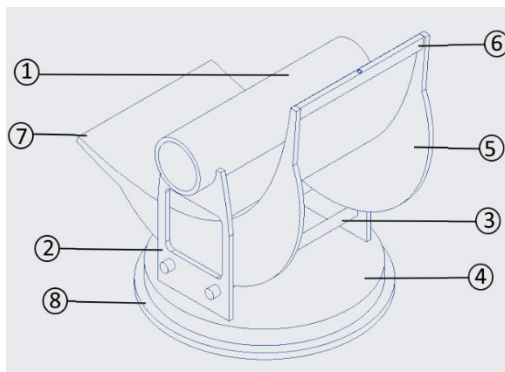
Le système établi par SunSaluter a été dimensionné pour un panneau solaire de 100W, de longueur 100 cm, largeur 55 cm et poids de 7 kg. Pour ces dimensions, le contrepoids doit avoir une masse de 2 kg et la masse initiale du "water clock bag", égale à 4 kg.

Après une analyse du marché des fours solaires à tubes vides ainsi que les nombreux plans à réaliser soi-même disponibles sur internet, la majorité de ces fours possèdent des dimensions légèrement plus faibles (longueur de 90 cm et largeur de 45-50 cm). Le four à tube possède également une masse plus faible, d'autant plus que notre seule partie mobile est la parabole (le tube et la nourriture restent à la même position pour une accessibilité optimale). Un système de contrepoids avec des dimensions similaires marchera donc parfaitement car la différence de couple due aux écarts de dimensions sera contrebalancée par un poids plus léger de la partie mobile (réduction des frottements au niveau du pivot).

### 3) Étude technique et dimensionnement :

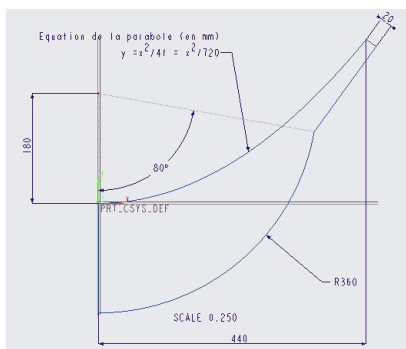
#### a) Fonctionnement du système :

Le système est composé de plusieurs éléments. La conception sur Creo nous a permis de représenter les principaux éléments du prototype, en excluant les éléments de fixation tels que les équerres, les charnières ou la visserie ainsi que les éléments d'accroche tels qu'une poignée ou un élastique pour maintenir le tube sur le support.



N°	Désignation	Quantité
1	Tube solaire	1
2	Support	2
3	Rouleau	2
4	Plaque tournante	1
5	Guide Parabole	1
6	Traverse	2
7	Réflecteur	1
8	Base plateau	1

La rotation selon l'axe x est assurée par le cylindre supportant la parabole, guidé par des rouleaux en acier placés en dessous. Cela maintient le centre du tube au point focal de la parabole, où les rayons solaires sont concentrés.



Le réflecteur a une forme parabolique car cette géométrie concentre les rayons solaires, assimilés à des rayons parallèles, vers une zone focale où est placé le tube de cuisson. L'équation retenue est  $y=x^2/720$ , correspondant à  $y=x^2/(4f)$ , donc à une focale  $f=180$  mm. Cette focale est adaptée au positionnement du tube et permet d'augmenter l'énergie reçue. L'ouverture d'environ  $80^\circ$  offre un compromis entre surface captée, compacité et transportabilité, tandis que le balancier assure le suivi du soleil.

La rotation selon l'axe z est assurée par un plateau tournant composé d'une base fixe et d'une plaque mobile, guidées par un roulement de table tournante Volumoon, supportant jusqu'à 200 kg, ce qui est largement suffisant et disponible pour une vingtaine d'euros.

Pour faciliter le transport et réduire l'encombrement, des charnières rendent le système pliable, avec la possibilité d'ajouter une poignée. En fonctionnement, il nécessite 1 m de hauteur, 90 cm de longueur et 61,4 cm de largeur. Replié, il devient compact et occupe environ  $72 \times 44 \times 65$  cm pour le stockage ou le transport.

## b) Les matériaux :

Pour le choix des matériaux, il y a différentes possibilités et le système est adaptable suivant les matériaux que l'on a si l'on ne souhaite pas en acheter de nouveaux et que l'on privilégie la récupération. Cependant, pour la structure, l'idéal serait d'utiliser du contreplaqué marine. En effet, ce bois a l'avantage d'être résistant à l'eau, donc la structure ne craindrait pas l'humidité. Or, si l'on estime que le four restera au sec, d'autres contreplaqués ou d'autres bois sont aussi possibles. Pour les traverses en bois permettant de renforcer la structure, il est possible de récupérer des morceaux de palettes.

Ensuite, pour réaliser le réflecteur, il faut utiliser une plaque d'aluminium poli miroir. Il est aussi possible de trouver en imprimerie des plaques d'aluminium offset afin de privilégier les matériaux de récupération.

Pour assurer le bon fonctionnement du système de suivi par contrepoids, il est important de limiter les frottements entre la parabole mobile et son support. Des frottements trop importants pourraient ralentir ou bloquer le déplacement, nécessiter un contrepoids plus lourd et diminuer la précision du suivi solaire. Comme le support est en bois et que la parabole repose sur des rouleaux métalliques, il est préférable d'ajouter une surface intermédiaire plus adaptée au roulement ou au glissement.

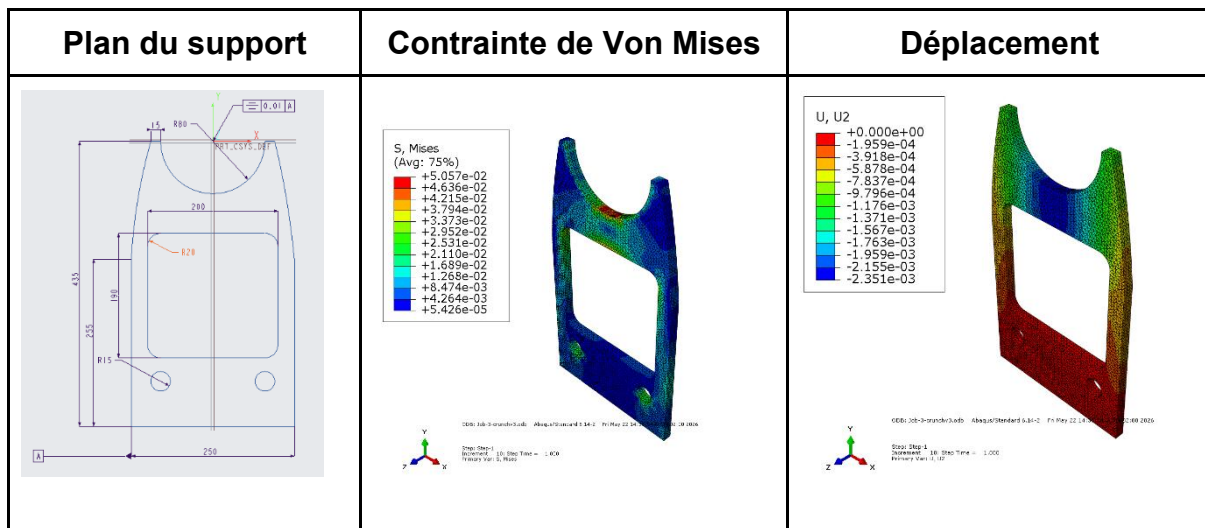
Dans une logique de récupération, plusieurs solutions sont possibles : ajouter des bandes de plastique issues d'une planche à découper en PEHD, utiliser des morceaux de PVC rigide ou de bidon plastique épais, fixer un rail métallique récupéré. La solution privilégiée serait l'utilisation de bandes en PEHD, car ce matériau présente un faible frottement, résiste à l'humidité et protège le bois de l'usure.

### c) La simulation :

Pour s'assurer du bon dimensionnement de notre système, nous avons réalisé une simulation par éléments finis sur Abaqus afin d'observer le comportement de notre support sous contrainte.

Le système repose sur deux supports identiques partageant la charge totale ; la plaque est donc testée avec la moitié des charges réelles : 5 kg pour le tube et son contenu (10 kg au total) et 0,575 kg pour la parabole (2,3 kg répartis sur deux rouleaux).

Le matériau choisi pour la simulation est le contreplaqué marine. Comme il subit uniquement de la compression, il est modélisé simplement comme un matériau isotrope. Ses propriétés sont un module de Young de 4000 MPa et un coefficient de Poisson de 0,3, pour une densité de 400 kg/m<sup>3</sup>.



Les résultats de la simulation donnent une contrainte de Von Mises maximale très faible de 0,050 MPa, ainsi qu'un déplacement maximal selon l'axe longitudinal de  $2,351 \times 10^{-3}$  mm en valeur absolue. La contrainte et le déplacement sont négligeables à l'échelle du prototype, la résistance en compression du contreplaqué étant comprise entre 2,0 et 2,5 MPa, ce qui indique que les risques de rupture ou de désalignement du centre du four/focale de la parabole sont négligeables.

Cette importante marge de sécurité offre une grande flexibilité et permet d'envisager l'utilisation de bois de réemploi, sans exigences strictes quant à leurs caractéristiques mécaniques initiales.

## 4) Dossier de réalisation et estimation des coûts :

Cette dernière partie présente les étapes concrètes d'assemblage du prototype ainsi qu'une évaluation financière démontrant la viabilité et la répliquabilité du modèle proposé pour l'association Zéro Déchet Troyes.

### a) Guide d'assemblage :

Le grand point fort de cet héliostat à bascule d'eau réside dans sa simplicité de fabrication. En effet, conçu selon une logique DIY (*Do It Yourself*), le montage est à la portée de tous : il s'assemble rapidement à l'aide d'outils à main basiques et ne demande aucune compétence technique pointue.

L'essentiel du système repose sur l'assemblage d'un châssis en bois, l'installation des axes pivot en matériaux de récupération et la mise en place d'une bouteille Mariotte "maison" (équipée de deux tubes et d'une valve) faisant office d'horloge hydraulique à débit constant.

Pour faciliter le passage à l'action, les utilisateurs pourront retrouver les plans détaillés et le guide pas à pas disponibles librement en ligne en accès *open source* sur le site internet de l'association

### b) Estimation des coûts :

Pour s'inscrire pleinement dans la thématique Action 3R et répondre aux attentes de l'association, l'usage de matériaux neufs a été réduit au strict minimum. Le tableau suivant présente le budget prévisionnel de notre solution :

Désignation du composant	Matériau / Provenance	Statut	Coût estimé (€)
Structure et châssis	Planches et tasseaux de palettes	Récupération	0 €
Réflecteur solaire	Feuille d'aluminium polymiroir (0.3mm)	Achat	~15 €
Réservoir & Système d'eau	Bouteille / Bonbonne	Récupération	0 €
Contenant de récupération d'eau	Bassine / Seau / Bidon usagé	Récupération	0 €
Régulateur de débit	Robinet de perfusion ou vanne de goutte à goutte	Achat	~3 €
Contrepoids	Bloc de béton / Brique / Pierre	Récupération	0 €
Visserie et fixations	Vis à bois standards / Fixations	Achat / Stock atelier	~1,5 €
Filtre anti-impuretés	Textile usage / Chute de tissu propre	Récupération	0 €
Axe de rotation	Tubes métalliques	Récupération	0 €
Système de suspension	Corde fine, ficelle agricole ou de jute	Récupération / Stock	0 €
Bande de glissement	Bande de PEHD / PVC / Bidon épais / Rail métallique	Récupération	0 €
Plateau tournant	Table tournante / ...	Achat	20 €

Comme le démontre notre budget prévisionnel, le coût global estimé de notre prototype s'élève à ~19,00 € sans la possibilité de tourner suivant l'élévation et ~39,00 € avec le plateau tournant suivant l'axe z. Ce montant, que l'on peut qualifier de moindre, confirme la parfaite adéquation entre notre héliostat et les réalités économiques du monde associatif et du grand public. Ici, le fait d'utiliser en grande partie des matériaux issus de la récupération présente trois avantages majeurs qui représentent la démarche Low-Tech :

- Un coût financier minime : La simple action de limiter les achats neufs aux seules pièces techniques indispensables (aluminium polymiroir pour la performance technique, la vanne pour la précision du débit et le plateau tournant si besoin) nous permet de rendre l'énergie solaire thermique accessible aux budgets modestes.
- L'économie circulaire : Du fait de détourner les « déchets » locaux de leur circuit de fin de vie dans l'objectif de leur donner une seconde vie utile, le projet applique concrètement le défi des 3R prôné par Zéro Déchet Troyes.
- Résilience et réparabilité totale : Si une pièce du mécanisme venait à rompre (une fuite du réservoir, une planche cassée, etc.), l'utilisateur n'aurait pas besoin de commander un composant. En effet, il lui suffit de chercher dans ses propres bacs de tri ou de récupération les composants nécessaires afin de pouvoir réparer son héliostat en quelques minutes.

## Conclusion :

Ce projet, mené intensément lors du Crunch time 2026 nous a montré qu'il est possible de concilier performance thermique et sobriété technologique. Face au défi proposé par l'association Zéro Déchet Troyes, notre équipe a validé une solution mécanique directe en éliminant les moteurs et ressorts au profit d'une balance hydraulique.

En acceptant une précision secondaire, entièrement compensée par la grande tolérance thermique du tube sous vide, nous avons privilégié un système 100% réparable, durable et accessible à tous pour un coût moindre. L'intégration d'éléments de récupération, comme le filtre ou encore le bac de récupération, nous pousse définitivement dans la philosophie de l'économie circulaire et des 3R.

Au-delà du livrable technique, ce rush de l'innovation a constitué une expérience humaine et professionnelle d'une grande richesse. Travailler sous une contrainte de temps aussi serrée nous a appris à manager un projet sous pression.