



INNOVATION **UTT**® **CRUNCH TIME**

Zéro Déchet Troyes - TELED avec la Low-tech

Groupe 603B

Noah GALLARDO - Davide GBAGUIDI - Yanis GERARD
Elisa GUILLAUME - Rémi HENRY - Arthur VERROUST

Sommaire

Sommaire.....	1
Introduction.....	1
Le TELED et les enjeux territoriaux.....	2
Les limites des systèmes de conservation actuels.....	2
Le concept TELED et l'approche Low-tech.....	2
Le potentiel du territoire aubois.....	2
Le séchoir solaire low-tech agricole.....	3
Besoin identifié.....	3
Principe général du séchoir solaire.....	3
Calculs énergétiques et dimensionnement des tubes MCP.....	4
Calculs énergétiques et dimensionnement du panneau solaire.....	5
Avantages, limites et viabilité.....	6
La chambre froide hydro-refroidie low-tech.....	7
Réponse à une problématique territoriale.....	7
Principe de fonctionnement.....	7
Dimensionnement des composants, choix des matériaux.....	8
Approvisionnement et gestion des flux logistiques.....	10
Limites du systèmes, axes d'amélioration.....	10
Conclusion.....	11

Introduction

Aujourd'hui, la conservation alimentaire repose majoritairement sur des systèmes fortement dépendants de l'énergie électrique. Chambres froides, séchoirs industriels ou infrastructures de stockage nécessitent une alimentation continue, engendrant des coûts énergétiques importants ainsi qu'un impact environnemental élevé. Dans un contexte de transition énergétique et d'augmentation du prix des ressources, ces modèles montrent leurs limites, notamment pour les territoires ruraux et agricoles. Le concept TELED, « Tâches Essentielles Lorsque l'Essentiel est Disponible », propose une approche différente : adapter les productions et les usages aux ressources naturelles disponibles localement. Cette logique s'inscrit dans une démarche low-tech visant à concevoir des systèmes plus sobres, plus résilients et plus adaptés aux contraintes territoriales. Dans ce contexte, une problématique émerge :

Comment le concept TELED peut-il permettre de repenser la conservation alimentaire dans le département de l'Aube grâce à des solutions low-tech exploitant les ressources naturelles locales ?

Pour répondre à cette problématique, nous avons développé deux solutions complémentaires : un séchoir low-tech permettant le séchage autonome de plantes et produits agricoles grâce à l'énergie solaire et au stockage thermique, et une alternative écologique à la chambre froide traditionnelle exploitant les ressources en eau et les principes thermodynamiques. Ces deux solutions ont pour objectif de démontrer qu'il est possible de repenser certains besoins essentiels à travers des systèmes locaux, durables et économiquement viables, tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles.

Le TELED et les enjeux territoriaux

Les limites des systèmes de conservation actuels

Le modèle actuel repose sur une logique de production en **flux tendu**, où les ressources énergétiques doivent être disponibles en permanence, sans prendre en compte l'intermittence naturelle de certaines ressources comme le soleil, le vent ou l'eau. Dans un contexte de transition énergétique et d'augmentation du coût des ressources, cette dépendance devient une limite croissante, rendant ces systèmes vulnérables sur les plans économique et environnemental.

Le concept TELED et l'approche Low-tech

Contrairement aux modèles industriels classiques, le TELED vise à organiser certaines activités en fonction des **ressources accessibles** à un **instant donné**. Cette logique s'accompagne naturellement d'une démarche low-tech, dont l'objectif n'est pas de maximiser les performances technologiques, mais de répondre efficacement à un besoin essentiel avec une **consommation minimale** de ressources. Les low-techs permettent ainsi d'exploiter directement les ressources naturelles intermittentes comme l'inertie thermique, le séchage solaire, les échanges thermiques naturels, sans nécessiter d'infrastructures lourdes.

Le potentiel du territoire aubois

Le département de l'Aube possède plusieurs caractéristiques favorables au développement de solutions inspirées du concept TELED. Son territoire est marqué par une **forte activité agricole** ainsi qu'un tissu rural important, créant des besoins significatifs en matière de conservation et de transformation des productions alimentaires. Le territoire bénéficie également de ressources naturelles variées pouvant être exploitées dans une logique low-tech. Les **2 000 heures d'ensoleillement annuelles** représentent une opportunité importante pour les systèmes solaires thermique ou photovoltaïque. Le **réseau hydrographique** du département, notamment avec la Seine, ainsi que plusieurs lacs et retenues d'eau, constitue également une ressource exploitable dans des systèmes de refroidissement ou de stockage thermique. Le domaine agricole apparaît comme le secteur le plus directement concerné, notamment pour le séchage de plantes, la conservation de productions maraîchères ou certaines filières biologiques. D'autres secteurs comme l'agroalimentaire, l'artisanat ou encore certaines activités de transformation locale pourraient aussi bénéficier de systèmes de conservation sobres en énergie. Dans ce contexte, le développement de solutions low-tech adaptées au territoire aubois pourrait permettre de réduire les coûts énergétiques, de limiter la dépendance aux infrastructures conventionnelles et de favoriser une approche plus locale et résiliente des productions alimentaires.

Le séchoir solaire low-tech agricole

Besoin identifié

Le département de l'Aube possède une forte activité agricole, notamment dans les cultures céréalières. Nous avons d'abord envisagé le développement d'un séchoir solaire destiné au séchage du blé. Cette solution semblait cohérente avec le territoire auboisi, fortement marqué par les grandes cultures et les besoins de conservation après récolte. Cependant, le **séchage du blé** nécessite le traitement de très grandes quantités de matière dans des temps relativement courts. Les besoins thermiques et les débits d'air nécessaires deviennent alors particulièrement importants, rendant la mise en œuvre d'une solution low-tech à petite échelle impossible. Nous avons alors réorienté notre réflexion vers le **séchage de plantes et de fleurs**, plus adapté à une démarche TELED low-tech. Plusieurs cultures présentes dans l'Aube, comme l'immortelle, les statices ou encore le Ginkgo biloba, nécessitent des procédés de conservation par séchage afin de préserver leurs propriétés esthétiques, aromatiques ou médicinales. Les immortelles et les statices sont notamment utilisées dans la décoration florale et dans les produits cosmétiques. Le Ginkgo biloba, quant à lui, est particulièrement utilisé pour ses propriétés médicinales. Les méthodes traditionnelles de séchage consistent à suspendre les plantes ou à les étaler dans des pièces sèches et ventilées durant plusieurs jours voire plusieurs semaines. Dans le cas des feuilles de Ginkgo biloba, on retrouve des procédés de séchage au feu de bois, entraînant des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de ressources supplémentaires. Le développement d'un séchoir solaire low-tech apparaît alors comme une solution pertinente qui permettrait d'accélérer le séchage tout en limitant les besoins énergétiques et l'impact environnemental du processus de conservation.

Principe général du séchoir solaire

La structure principale du séchoir est constituée d'une cabane fixe possédant une isolation thermique, limitant les pertes énergétiques. À l'intérieur du séchoir, les plantes sont disposées sur différents rayonnages. L'objectif est d'accélérer l'évaporation de l'humidité contenue dans les plantes tout en conservant leurs propriétés esthétiques, aromatiques ou médicinales. Les **tubes solaires thermiques** ([voir Annexes Figure 1](#)) utilisés dans le système absorbent le rayonnement solaire à l'extérieur de la cabane. Chaque tube possède une couche de borosilicate, un espace de vide, puis une surface noire en nitrure de titane ([voir Annexes Figure 2](#)), pour recréer un effet de serre, ce qui permet d'absorber le rayonnement et de le transformer en chaleur. Le système intègre aussi des **matériaux à changement de phase** (MCP) qui stockent l'énergie thermique captés par les tubes dans le cas fermé, sous forme de chaleur latente lors de leur changement d'état. En effet, ils fondent à une température fixe en stockant l'énergie. Dans le cas ouvert, les MCP sont exposés à l'air libre, ils se solidifient progressivement et restituent la chaleur accumulée. Ce phénomène permet de maintenir une température élevée dans le séchoir sur une longue période. Une **remorque mobile** servant de support aux tubes solaires, permet d'envisager un fonctionnement par relais. Une remorque rechargée durant la journée peut être connectée au séchoir pendant qu'une seconde remorque est exposée au soleil afin d'accumuler de l'énergie thermique. Ce fonctionnement permet d'assurer une continuité partielle du séchage malgré l'intermittence de l'énergie solaire.

La **circulation de l'air** à l'intérieur du séchoir est assurée par deux ventilateurs placés de chaque côté de la structure, soufflant à 45°, alimentés par un panneau solaire. Leur rôle est d'envoyer de l'air vers les MCP afin de chauffer l'ensemble de la structure de bas en haut grâce à la convection, de manière à éviter les zones mortes et d'homogénéiser la température. Les ventilateurs permettent également de réduire l'humidité. Des événements de sortie et une grille d'entrée sont nécessaires pour renouveler l'air afin d'évacuer l'humidité et éviter la condensation, pouvant entraîner de la moisissure. Ainsi, l'ensemble du système ([voir Annexes Figure 3](#)) repose sur des principes physiques simples comme le chauffage solaire, le stockage thermique et la circulation d'air permettant de concevoir une solution cohérente avec une démarche TELED low-tech, en exploitant directement les ressources naturelles disponibles localement.

Calculs énergétiques et dimensionnement des tubes MCP

Tous ces calculs seront réalisés pour 1 tonne de matière fraîche à sécher. Nous considérons 2 cas. Premièrement le cas nominal, où les récoltes ont pu être pré-séchées naturellement dans le champ (taux d'humidité de 50%). Deuxièmement, un cas critique où les récoltes sont très humides (taux d'humidité de 70%).

Données utiles :

c : capacité thermique massique moyenne (3.5 kJ d'énergie pour augmenter la température de 1 kg de matière végétale de 1°C)

K : facteur de sécurité lié aux pertes thermiques

t : temps de séchage estimé pour 20 h et 40h

G : irradiance solaire → environ 900 W/m² dans l'Aube lors de l'ensoleillement

T_{initial} : température extérieure estimée à 15°C

Tableau regroupant les MCP utilisés :

MCP	Température de fusion	Chaleur latente L	Densité solide ρ	Description
Acide Caprique	35°C	152 kJ/kg	1 030 kg/m ³	Acide gras d'origine végétale extrait de l'huile de noix de coco ou de palmiste
Acide Laurique	44°C	178 kJ/kg	880 kg/m ³	Acide gras végétal issu de l'huile de coco

Option 1 : Fleurs d'immortelles ou de statices

Eau à enlever : 1 000 kg * 0,5 = 500 kg → on veut 100 kg restant donc on enlève **400kg**

Evaporation : $E_v = 400 * L_{eau} = 400\text{kg} * 2\,257\text{ kJ/kg} = 902\,800\text{kJ}$

Chauffage : $E_c = m_{tot} * c * (T_{sechage} - T_{initial}) = 1\,000\text{ kg} * 3.5\text{ kJ/kg} * 20 = 70\,000\text{kJ}$

Total E : $E = (E_v + E_c) * K = 972\,800\text{ kJ} * 1.5 = 1\,459\,200\text{ kJ}$

Puissance : $P = E/t$ → pour t = 20 h, $P = 1\,459\,200\text{ kJ} / 20 * 3\,600\text{ s} = 20.27\text{ kW}$; pour t = 40 h, $P = 1\,459\,200\text{ kJ} / 40 * 3\,600\text{ s} = 10.13\text{ kW}$

Surface solaire : $P_1 = G * \eta * S = 900\text{ W/m}^2 * 0.9 * A \rightarrow A = 20.27\text{ kW} / (0.9 * 0.9) = 25\text{ m}^2$

$P_2 = G * \eta * S = 900\text{ W/m}^2 * 0.9 * A \rightarrow A = 10.13\text{ kW} / (0.9 * 0.9) = 12,5\text{m}^2$

Nombre de tubes :

Séchage 20 h : Sur le marché français, on trouve des tubes solaires de 1.8m de long avec 5.8cm de diamètre. On a $A = 25\text{ m}^2$ et $A_{tube} = 0.33\text{ m}^2 \rightarrow 76\text{ tubes}$

Chez les fabricants chinois, on retrouve des tubes de 2.4 m de long avec 12.5 cm de diamètre. On a $A = 25 \text{ m}^2$ et $A_{\text{tube}} = 0.94 \text{ m}^2 \rightarrow 24 \text{ tubes}$

Séchage 40 h : fr $\rightarrow A = 12.5 \text{ m}^2$ et $A_{\text{tube}} = 0.33 \rightarrow 38 \text{ tubes}$; ch $\rightarrow A = 12.5 \text{ m}^2$ et $A_{\text{tube}} = 0.94 \rightarrow 14 \text{ tubes}$

Quantité MCP : On choisit l'acide Caprique $\rightarrow L = 152 \text{ kJ/kg}$

$$E_{\text{MCP}} = E_{\text{tot}} = 1459200 \text{ kJ}$$

$$E_{\text{MCP}} = m_{\text{tot,MCP}} * L \rightarrow m_{\text{tot,MCP}} = E_{\text{MCP}} / L = 9600 \text{ kg} \rightarrow V_{\text{tot,MCP}} = m_{\text{tot,MCP}} / \rho = 9.32 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{int,tube}} = \pi * r_{\text{int}}^2 * 2.4 * 0.85 = 0.0183 \text{ m}^3 \quad (*0.85 \text{ car en liquide} \rightarrow +15\% \text{ de volume})$$

$$\text{avec } r_{\text{int,ch}} = r - (e_{\text{boro}} + e_{\text{vide}} + e_{\text{noir}}) = 6.75 \text{ cm} - (0.3\text{cm} + 0.8\text{cm} + 0.3\text{cm}) = 5.35 \text{ cm}$$

$$m_{\text{tube}} = 9600 \text{ kg} * 0.0183 \text{ m}^3 / 9.32 \text{ m}^3 = 18.85 \text{ kg} \rightarrow 509 \text{ tubes nécessaires}$$

De même, on dimensionne pour le cas critique. Nous obtenons le tableau suivant :

Immortelles / Statices	E (kJ)	P _{20h} (kW)	A _{20h} (m ²)	P _{40h} (kW)	A _{40h} (m ²)	nb _{fr} tubes	nb _{ch} tubes	m _{tot,MCP} (kg)	nb _{MCP} tubes
Cas nominal	1459200	20.27	25	10.13	12.5	76 ou 38	24 ou 14	9600	509
Cas critique	2136300	29.67	36.63	14.84	18.32	111 ou 56	39 ou 20	14055	746

Option 2 : Feuilles de ginkgo biloba

Pour le ginkgo biloba nous obtenons le tableau suivant :

Ginkgo biloba	E (kJ)	P _{20h} (kW)	A _{20h} (m ²)	P _{40h} (kW)	A _{40h} (m ²)	nb _{fr} tubes	nb _{ch} tubes	m _{tot,MCP} (kg)	nb _{MCP} tubes
Cas nominal	1506450	20.92	25.83	10.46	12.91	79 ou 40	28 ou 14	8463	526
Cas critique	2183550	30.33	37.44	15.16	18.72	114 ou 57	40 ou 20	12267	765

Calculs énergétiques et dimensionnement du panneau solaire

Pour assurer le bon fonctionnement du séchoir dans une démarche low-tech, nous avons choisi d'utiliser un [panneau solaire thermique standard](#) possédant une surface moyenne de : $S = 2.5 \text{ m}^2$. Le système de ventilation repose sur deux [ventilateurs basse consommation](#) de 43 W chacun avec un débit d'air de $408 \text{ m}^3/\text{h}$. En considérant une durée moyenne de fonctionnement de 8 h par jour durant la période estivale dans l'Aube, la consommation énergétique journalière du système de ventilation peut être estimée par :

$$E_{\text{besoin}} = P \times t = 43 \times 2 \times 8 = 688 \text{ Wh/jour} = 0.688 \text{ kWh/jour}$$

Avec P la puissance en Watts et t le temps en heures.

Nous estimons l'énergie thermique journalière produite par le panneau solaire thermique :

$$E_{\text{fournie}} = S \times G \times \eta = 2.5 \times 3.6 \times 0.4 = 3.6 \text{ kWh/jour}$$

Avec G l'irradiance solaire et η le rendement d'un panneau solaire thermique. D'après les données d'irradiation solaire moyenne, l'Aube reçoit environ : $3.6kWh/m^2/jour$. Le rendement moyen choisi est de 40% pour éviter de surestimer les performances du système.

L'énergie produite couvre largement les besoins de ventilation. Toujours dans une démarche TELED et low-tech, l'excédent peut être valorisé pour le préchauffage d'eau, le maintien thermique du séchoir ou d'autres usages agricoles compatibles avec la démarche low-tech.

Avantages, limites et viabilité

Tableau des coûts estimés :

Equipement	Coût estimé
Panneau solaire thermique	400 €
Ventilateurs basse consommation (x2)	200 €
Remorque	3 000 €
Cabane + claies	6 000 €
MCP : acide caprique et acide laurique	117,2 €/kg et 64,4 €/kg

Dans une démarche low-tech, La cabine et la remorque peuvent être fabriquées à partir de matériaux simples (bois, métal, isolant), limitant les coûts et facilitant la réparabilité. En revanche, le coût et le volume des MCP sont prohibitifs si ceux-ci sont placés dans les tubes. Il est préférable de les installer dans un bac externe sur la remorque, avec transfert de chaleur par fluide caloporteur.

Finalement, l'investissement financier n'en vaut pas la peine au vu de nos calculs. Cependant, nous avons posé beaucoup d'hypothèses nous positionnant dans un cas général critique :

1. 1000 kg de plantes → nous pouvons réduire à 100 kg pour un plus petit agriculteur
2. $E_{MCP} = E_{tot}$ → préférable d'imposer un facteur entre 0 et 1, or notre solution deviendra un complément de séchage
3. $K = 1.5$ → 50% de pertes thermiques, nous pouvons réduire ce coefficient
4. $t = 20$ h → séchage rapide, donc puissance maximale requise
5. Cas critique → taux d'humidité initiale de 70% (sans pré-séchage naturel)
6. Utilisation de tubes existant déjà sur le marché → mauvaise adaptation à notre solution

Ce que ça montre positivement :

- La faisabilité physique du principe (les MCP peuvent stocker l'énergie nécessaire)
- Les limites d'échelle du système (pertinent pour 50-100 kg, pas 1000 kg)
- Un outil de dimensionnement réutilisable pour une grande variété de configurations

La chambre froide hydro-refroidie low-tech

Réponse à une problématique territoriale

Territoire profondément agricole, l'Aube est naturellement soumise à des problématiques de production, de transport, mais aussi de conservation des denrées produites. Aujourd'hui, l'industrie du stockage frigorifique globale ou territoriale repose presque exclusivement sur des systèmes totalement dépendants de l'énergie électrique, au fort impacts environnementaux. Que ce soit dans leur fabrication, avec des matériaux non recyclables et polluants, ou dans leur utilisation, par leur consommation électrique, une optimisation de ces systèmes au regard de critères non pas de consommation, mais de respect social et de durabilité semble nécessaire. Face à ce constat, nous avons voulu repenser ce problème de conservation des aliments dans l'esprit TELED. Aussi, notre seconde solution propose une alternative écologique et économique à la chambre froide traditionnelle. Nous exploitons directement les ressources naturelles disponibles dans notre département, à savoir l'eau et l'énergie solaire, couplées à de simples principes physiques et thermodynamiques, pour refroidir l'eau à une température comprise entre zéro et cinq degrés, de manière autonome. L'espace de conservation est ainsi refroidi grâce à cette source froide, sans besoin électrique supplémentaire que l'acheminement de l'eau par une pompe hydraulique.

Principe de fonctionnement

L'eau est récupérée dans un cours d'eau grâce à une pompe électrique, et est filtrée afin d'intercepter les impuretés qui pourraient abîmer le circuit par la suite. Pour cela, l'eau liquide passe à travers différentes couches filtrantes, constituées de matériaux naturellement filtrants: gravier, sables, et charbon actif. L'eau est ensuite récupérée dans une cuve tampon, déjà pleine, ne perturbant pas en temps normal (approvisionnement en eau) le débit du liquide. Cette cuve réalise, lors de périodes de sécheresse, un effet tampon, permettant au système de fonctionner plus longtemps, afin d'autoriser à l'utilisateur un temps d'adaptation. L'eau est ensuite amenée pour être refroidie. Le refroidissement de l'eau glycolée au sein de la cuve de stockage d'énergie sensible s'appuie sur deux principes thermodynamiques fondamentaux : au niveau de l'évaporateur immergé, le fluide frigorigène (ammoniac) effectue un changement d'état liquide-vapeur de nature isobare et isotherme à la température de saturation basse de -5°C . Cette transformation absorbe la chaleur latente d'évaporation (ΔH_{vap}) du fluide depuis le milieu environnant. Du côté de la cuve, la masse d'eau subit un refroidissement sensible sans changement de phase (maintien de l'état liquide grâce à l'adjonction de glycol). Les calories de l'eau sont extraites par conduction à travers la paroi de l'échangeur puis évacuées par convection naturelle. À mesure que l'eau se refroidit, sa masse volumique augmente, générant des courants de convection descendants homogénéisant thermiquement le volume de stockage. Cette eau refroidie est ensuite stockée dans une cuve d'eau froide, puis envoyée dans la chambre froide pour maintenir, grâce à un trajet en serpentins dans ses murs, à la température voulue, avant d'être filtrée pour être relâchée dans le cours d'eau originel. D'un point de vue thermique, le système proposé est entièrement viable, avec des pertes thermiques équivalentes aux produits disponibles sur le marché. La rupture intervient sur les aspects économiques et environnementaux. Le coût d'alimentation d'une chambre froide classique s'élève à environ 125 euros par mois. En comparaison, le coût d'exploitation de notre solution est négligeable, seule la pompe hydraulique nécessitant une alimentation électrique. De plus, l'impact environnemental est

lui aussi limité, puisque notre solution s'appuie sur des matériaux naturels et recyclables, avec une durée de vie d'une dizaine d'années. ([voir Annexes Figure 4](#))

Dimensionnement des composants, choix des matériaux

Axe Technique 1 : Dimensionnement de la Chambre Froide Hydro-Réfrigérée Solaire

L'enveloppe de l'enceinte rejette l'usage des mousses de polyuréthane industrielles au profit de plaques rigides de liège expansé ou de fibre de bois à haute densité. Les paramètres physiques retenus pour les calculs d'ingénierie sont :

- Conductivité thermique (λ) : 0,040 W.m⁻¹.K⁻¹
- Épaisseur de la couche isolante (e) : 15 cm (soit 0,15 m)
- Chaleur massique du matériau (Cp) : 1 800 J.kg⁻¹.K⁻¹
- Masse volumique (ρ) : 120 kg.m⁻³

Analyse de l'Acier Inoxydable : Pourquoi est-il Négligé en Régime Permanent ? : Pour satisfaire aux exigences d'hygiène alimentaire et assurer une parfaite lavabilité en accord avec les objectifs zéro déchet, les parois internes et externes de la structure sont constituées de tôles d'acier inoxydable de 2 mm d'épaisseur. Cependant, l'inox est volontairement omis dans les calculs de déperdition thermique continue pour les motifs physiques suivants : La conductivité thermique de l'acier inoxydable est extrêmement élevée ($\lambda_{\text{inox}} \approx 16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). La résistance thermique d'une tôle de 2 mm s'élève à : $R_{\text{inox}} = e / \lambda = 0,002 / 16 = 0,000125 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$. Rapportée à la résistance thermique de l'isolant biosourcé ($3,75 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$), la contribution de l'inox à l'isolation globale représente moins de 0,0033 %. Son influence sur le flux de chaleur traversant est donc mathématiquement insignifiante. De plus, l'inox possède une masse volumique importante ($\rho_{\text{inox}} \approx 7\,900 \text{ kg.m}^{-3}$) et une chaleur massique de 500 J.kg⁻¹.K⁻¹. Pour une masse structurelle estimée à 250 kg d'inox, l'énergie requise pour sa mise en température initiale (de 25°C à 5°C, soit un ΔT de 20 K) correspond à : $Q_{\text{inox}} = m \times C_p \times \Delta T = 250 \times 500 \times 20 = 2\,500\,000 \text{ Joules}$ (soit 694 Wh ou 0,694 kWh). Bien que cette charge transitoire doit être anticipée au démarrage, elle devient nulle une fois le régime permanent établi, car les parois métalliques restent stabilisées à leur température de consigne.

Calculs des Déperditions Thermiques en Régime Établi: Le volume interne de l'enceinte est calibré à 4,9 m³ pour des dimensions de 1,6 m × 1,4 m × 2,2 m, ce qui engendre une surface d'échange totale externe (parois, plancher, plafond) de $A = 18,56 \text{ m}^2$.

La résistance thermique de l'isolant est calculée par : $R = e / \lambda = 0,15 / 0,040 = 3,75 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$

Le coefficient de transmission thermique global (U) de la paroi s'établit à : $U = 1 / R = 1 / 3,75 = 0,2667 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

En fixant des conditions estivales critiques dans l'Aube (température extérieure de 25°C, température intérieure cible de 5°C, soit un gradient thermique continu $\Delta T = 20 \text{ K}$) :

- **Flux thermique instantané de déperdition (ϕ)** :
 $\phi = U \times A \times \Delta T = 0,2667 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \times 18,56 \text{ m}^2 \times 20 \text{ K} = 99 \text{ W}$
- **Demande énergétique journalière de maintien (E_froid)** :
 $E_{\text{froid}} = \phi \times 24 \text{ h} = 99 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 2\,375 \text{ Wh/jour} = 2,375 \text{ kWh/jour}$

La capacité thermique surfacique de notre paroi ($C_{\text{surf}} = \rho \times C_p \times e = 120 \times 1800 \times 0,15 = 32\,400 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) garantit un déphasage thermique performant de 10 à 12 heures, bloquant l'onde de chaleur diurne jusqu'à la fraîcheur nocturne.

Étude Comparative Quantitative avec la Solution Industrielle (Mousse PU): Le tableau ci-dessous compare les performances de notre enceinte de 4,9 m³ face à la cellule industrielle référencée (panneaux sandwichs en polyuréthane de 80 mm) :

Paramètre de comparaison	Solution Écologique TELED	Solution Industrielle Standard
Nature de l'isolant	Liège expansé / Fibre de bois	Mousse de Polyuréthane (PU)
Épaisseur de l'isolant	15,00 cm	7,65 cm (commerce 80mm)
Coefficient de transmission	0,2667 W.m ⁻² .K ⁻¹	0,2875 W.m ⁻² .K ⁻¹
Flux de déperdition (à ΔT = 20 K)	99,00 W	106,72 W
Consommation d'énergie journalière	2,375 kWh/jour	2,561 kWh/jour
Bilan fin de vie & Impact cycle	Neutre en carbone, biodégradable	Déchets pétrochimique complexe

Conclusion de l'analyse comparative : Notre conception en sur-isolation biosourcée s'avère **7,2 % plus performante** qu'une enceinte industrielle haut de gamme en polyuréthane, tout en éliminant l'usage de polymères issus de la pétrochimie.

Axe thermique 2: Rendement et efficacité énergétique

Modélisation du Cycle de Carnot et Efficacité du Projet Écologique: Le rendement maximal théorique est modélisé par le cycle de Carnot opérant entre la source froide de consigne de l'enceinte ($T_{\text{froid}} = 5^{\circ}\text{C} = 278 \text{ K}$) et la source chaude ambiante ($T_{\text{chaud}} = 25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$) : $\text{COP}_{\text{Carnot}} = T_{\text{froid}} / (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}) = 278 / 20 = 13,9$

En intégrant le coefficient de performance réel de notre machine à absorption ($\text{COP}_{\text{réel}} = 3,1$), le rendement exergetique global (η_p) s'établit à : $\eta_p = (\text{COP}_{\text{réel}} / \text{COP}_{\text{Carnot}}) \times 100 = (3,1 / 13,9) \times 100 = 22,3 \%$

Comparaison Thermodynamique avec le Froid Négatif Industriel: Les installations industrielles classiques visent souvent la congélation en froid négatif, ce qui dégrade drastiquement l'efficacité thermodynamique théorique : Pour une consigne de congélation à -15°C (258 K) : $\text{COP}_{(-15)} = 258 / (298 - 258) = 6,45$. Pour une consigne de surgélation à -25°C (248 K) : $\text{COP}_{(-25)} = 248 / (298 - 248) = 4,96$

Le rendement relatif industriel s'établit à : $\eta_i = (4,96 / 6,45) \times 100 = 76,9 \%$.

Analyse thermodynamique : En choisissant rigoureusement une température de conservation positive ($+5^{\circ}\text{C}$) adaptée aux besoins physiologiques des végétaux, le COP théorique de notre projet (13,9) est plus de deux fois supérieur à celui du froid négatif industriel (6,45). Cette sobriété fonctionnelle est la clé pour valider le couplage avec l'énergie solaire.

Calcul de Dimensionnement de la Batterie Thermique (Autonomie sans Soleil): Pour lisser l'intermittence du gisement solaire et tolérer une couverture nuageuse prolongée dans la région de Troyes, nous calibrons une cuve de stockage thermique de 1 000 Litres ($m = 1\,000 \text{ kg}$ d'eau glycolée). La plage de température utile s'étend de -5°C (charge maximale) à $+5^{\circ}\text{C}$ (décharge maximale), soit un ΔT_{utile} de 10 K. La capacité thermique spécifique équivalente est de $1,16 \text{ Wh.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

L'énergie frigorifique stockée est de : $E_{\text{stockage}} = m \times C_{p_{\text{eau}}} \times \Delta T_{\text{utile}} = 1\,000 \times 1,16 \times 10 = 11\,600 \text{ Wh} = 11,6 \text{ kWh}$. **L'autonomie nette de la chambre froide** sans aucun apport solaire s'élève à : $\text{Autonomie} = E_{\text{stockage}} / E_{\text{froid}} = 11,6 \text{ kWh} / 2,375 \text{ kWh/jour} = 4,88 \text{ jours}$. Le système peut ainsi maintenir la chaîne du froid pendant près de **5 jours** consécutifs de nébulosité totale.

Calcul de Dimensionnement du Champ Solaire Thermique Requis : Pour restituer les 2,375 kWh de froid nécessaires chaque jour, **l'énergie thermique brute à fournir au générateur** de la machine à absorption est de : $E_{\text{thermique}} = E_{\text{froid}} / \text{COP}_{\text{réel}} = 2,375 / 3,1 = 0,766 \text{ kWh/jour de}$

chaleur utile.

L'Aube dispose d'un rayonnement estival moyen transmettant 4 kWh/m²/jour au sol. Avec un rendement optique et thermique moyen de 50 % pour nos concentrateurs low-tech, l'énergie récupérée est de 2 kWh/m²/jour.

La surface minimale de miroir requise est de : $S = E_{\text{thermique}} / \text{Énergie_utile} = 0,766 / 2 = 0,383 \text{ m}^2$. L'adoption d'une parabole solaire standard de **2 m²** (facteur de sécurité supérieur à 5) assure une recharge intégrale journalière de la batterie thermique en moins de deux heures d'ensoleillement direct.

Approvisionnement et gestion des flux logistiques

Cette partie du projet concerne l'approvisionnement des fruits et légumes et relève du domaine du génie industriel. L'objectif est d'analyser les flux logistiques, les capacités de stockage et les risques de saturation de la chambre froide. Les produits arrivent depuis les fournisseurs selon une loi normale : $N(120, 35^2)$. Cela correspond à une arrivée moyenne de **120 kg** par jour avec un écart-type de **35 kg** afin de représenter les variations de récolte. Les produits passent ensuite dans une file d'attente infinie gérée selon le principe FIFO (First In First Out), permettant d'assurer une bonne rotation des stocks. Après réception et contrôle qualité, ils sont dirigés vers un stock tampon modélisé par : $N(80, 20^2)$. Le stock tampon permet de réguler les variations de flux avant l'entrée dans la chambre froide. La chambre froide hydro-refroidissante possède un volume d'environ 5 m³, une capacité maximale de 500 kg et une température de conservation fixée à 5 °C. Enfin, la préparation des commandes suit la loi : $N(100, 25^2)$, soit une préparation moyenne de **100 kg** par jour avec un écart-type de **25 kg** avant expédition vers les marchés et circuits de distribution. Le système est dimensionné afin de respecter : $P(\text{Stock} > 500) < 5\%$, ce qui permet de limiter les risques de saturation et d'assurer une gestion stable des flux logistiques. ([voir Annexes Figure 5](#))

Limites du systèmes, axes d'amélioration

Le déploiement de la doctrine TELED dans l'Aube présente des opportunités écologiques, mais se heurte à trois limites structurelles majeures :

- **Économique** : Un investissement initial (CAPEX) très élevé pour les installations solaires et les matériaux biosourcés, ce qui impose des compromis techniques pour rester viable.
- **Technique et environnemental** : Une forte dépendance à la météo (limitée à 5 jours d'autonomie), un encombrement au sol important dû à l'isolation et une régulation thermique moins précise que le modèle électrique traditionnel.
- **Organisationnel et humain** : L'obligation d'abandonner la logistique en « flux tendu » pour synchroniser la production avec le soleil, ce qui exige un changement culturel et une refonte complète des plannings agricoles et industriels.

Conclusion

Pour conclure, cette étude démontre la viabilité et la pertinence de la doctrine TELED et de l'approche low-tech pour repenser le modèle de conservation alimentaire dans le département de l'Aube. À travers le développement du séchoir solaire agricole à matériaux à changement de phase et de la chambre froide hydro-refroidie, le projet prouve qu'il est techniquement et physiquement possible de réduire la dépendance aux énergies fossiles et à l'électricité continue en exploitant les ressources naturelles locales comme l'ensoleillement et le réseau hydrographique. Bien que ces solutions offrent des coûts d'exploitation minimales et un impact environnemental limité par rapport aux standards industriels, leur déploiement se heurte néanmoins à des barrières structurelles : un investissement initial (CAPEX) élevé pour les installations solaires et les matériaux biosourcés, des contraintes spatiales d'encombrement et une dépendance directe aux aléas météorologiques. Au-delà de la technique, la réussite de ce modèle repose sur une transformation organisationnelle et humaine profonde, exigeant des acteurs agricoles l'abandon de la logistique en « flux tendu » au profit d'une production synchronisée avec les cycles du soleil. En adaptant ces systèmes à des échelles appropriées et en accompagnant ce changement culturel, ces innovations low-tech dessinent une trajectoire prometteuse vers une autonomie et une résilience durables pour le territoire aubois.

Annexes



Figure 1 - tube solaire thermique



Figure 2 - Composants du tube solaire thermique

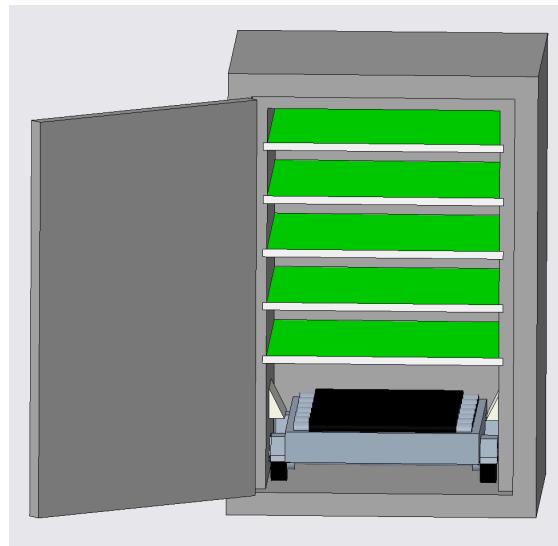


Figure 3 - modèle CAO du séchoir solaire low-tech agricole

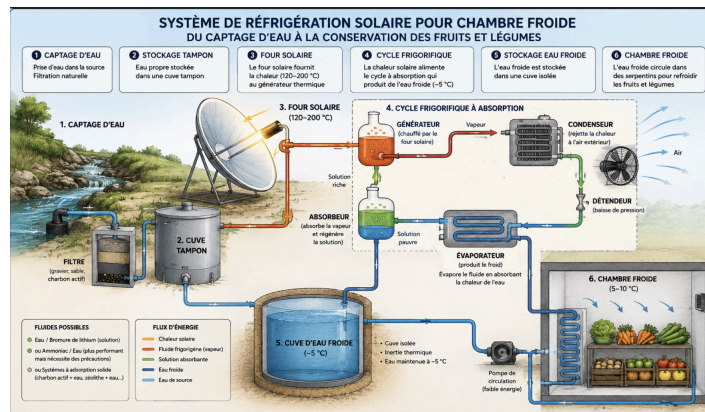


Figure 4 - schéma explicatifs de la chambre froide à hydr refroidissement

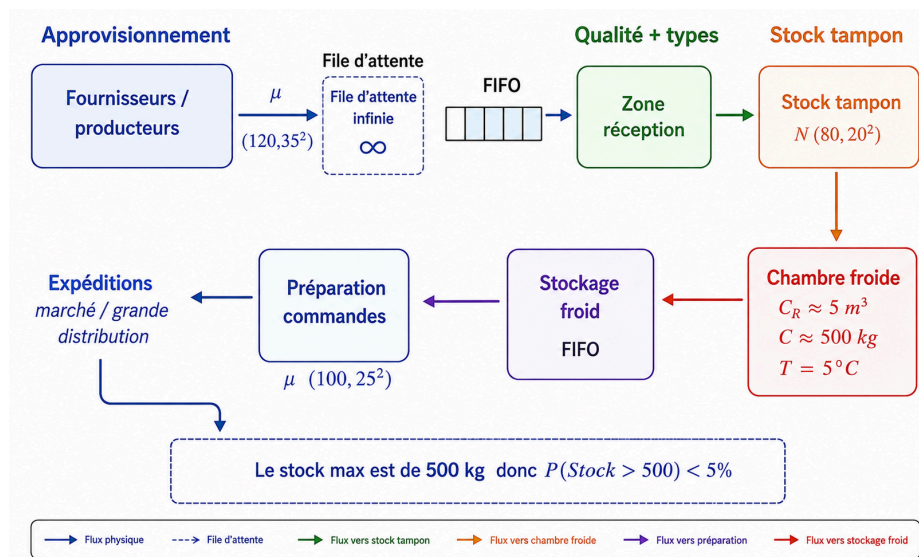


Figure 5 - schéma d'approvisionnement du système de chambre froide