

PROJET PERSONNEL
DE RECHERCHE

STOCKAGE D'ÉNERGIE

ÉTUDE ET MODÉLISATION D'UNE BATTERIE THERMIQUE À MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE

Stockage thermique solaire à base d'érythritol

TUTEUR : YOANN JOLIFF

ALIYA MAKROUM--DELLA RICCIA

2025/2026

PLAN DE LA PRÉSENTATION

01

Problématique & Objectifs

Contexte énergétique et enjeux du stockage thermique

02

Principes thermodynamiques

Qu'est-ce qu'un MCP ? Chaleur latente vs sensible

03

Pourquoi l'érythritol ?

Propriétés, avantages, limites et comparaison des MCP

04

Choix technologiques

Fluide caloporteur, échangeur, matériaux, isolation

05

Modélisation numérique

Simulations MATLAB : charge, stockage, décharge

06

Résultats & Limites

Performances, analyse critique, perspectives

Dans quelle mesure une batterie thermique à base d'érythritol permet-elle de stocker puis restituer efficacement la chaleur solaire pour un usage domestique, malgré les limites cinétiques imposées par la faible conductivité thermique du matériau ?

Limite du stockage sensible

énergie = élévation de température
 $\rightarrow Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$

- 1 m³ d'eau à 80°C stocke ~35 kWh
- Un MCP stocke 3 à 4× plus dans le même volume
- Restitution à température constante
- Faible densité énergétique des ballons d'eau

5 axes du projet

- Démontrer l'intérêt du stockage latent vs. sensible
- Évaluer la capacité de l'érythritol (maquette → batterie)
- Modéliser sous MATLAB : charge, stockage, décharge
- Analyser les limites physiques (conductivité, croûte)
- Identifier les conditions de viabilité technologique

Matériau à Changement de Phase

Stockage thermique par changement d'état physique. Exploite la chaleur latente : l'énergie stockée à la fusion est restituée à la solidification, à température CONSTANCE.

⚡ CHARGE

Source solaire chauffe le MCP jusqu'à 118°C (fusion)

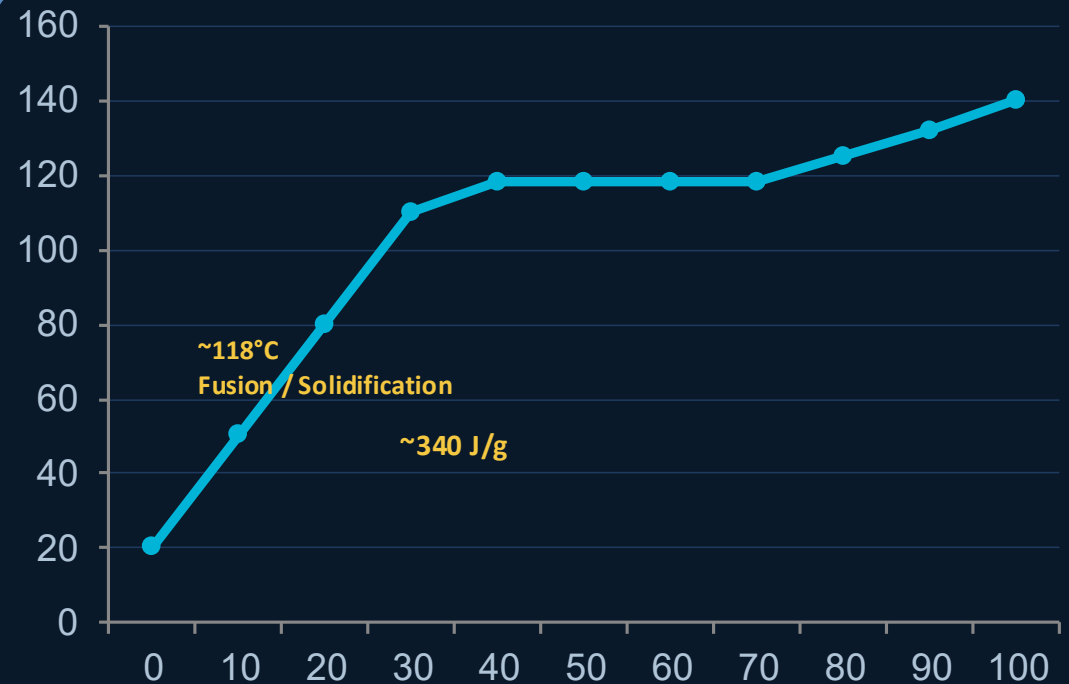
🌡 STOCKAGE

Palier thermique à 118°C grâce à l'isolation

🔥 DÉCHARGE

Solidification → restitution de Q_{latent} au fluide froid

Courbe Temperature = f(Énergie stockée)



Érythritol : $T_f = 118^\circ\text{C}$ | $L_f = 340 \text{ kJ/kg}$ | $\lambda = 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ | $\rho = 1450 \text{ kg/m}^3$

MCP	Tf (°C)	Lf (kJ/kg)	λ (W/m·K)	Coût	Sécurité
Érythritol	118–120	340	0,40	~100€/kg	Non toxique
Acide stéarique	69	203	0,17	~5€/kg	Sûr
Paraffine RT100	99	168	0,20	~8€/kg	Inflammable
Nitrate de sodium	307	199	0,50	~1€/kg	Corrosif

✅ Atouts de l'érythritol

- Biosourcé, non toxique, biodégradable
- Tf = 118°C : idéal pour le solaire thermique
- Lf = 340 kJ/kg : densité énergétique élevée
- Stable chimiquement sur cycles répétés

⚠ Limites & solutions

- Faible conductivité (0,4 W/m·K) → échangeur dense
- Expansion volumique → ciel gazeux (15–20%)
- Surfusion → agents nucléants
- Coût élevé (~100€/kg) → compromis technico-éco

Fluide caloporteur

Eau sous pression

$C_p = 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (excellent)
Circuit fermé à 2,1 bars
→ Évite l'ébullition à 118°C
Calcul Clausius-Clapeyron :
 $P = 1,84 \text{ bar} \rightarrow 2,1 \text{ bar}$ (marge sécu.)

Huile thermique

$C_p \sim 2000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Pression atm

Échangeur de chaleur

Acier inox

Faisceau tubulaire dense :
 $\sim 305 \text{ tubes} \times 0,9 \text{ m}$
Surface : 34 m^2
Compense la faible conductivité
de l'érythritol ($0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)

Verre (labo)

Croute observable

Isolation thermique

Sous vide

Industriel : isolation sous vide
Pertes $< 5 \text{ W}$ sur 24h
Rendement global : $> 90\%$

~ vide

Maquette : thermos ou polystyrène

Trois modèles complémentaires ont été développés :

M1

Modèle énergétique simplifié

200 g d'érythritol

$$Q_{latente} = m \times L_f = 68\,000\text{ J}$$

Équivalent à chauffer 347 g d'huile de 20°C à 118°C
Stockage : 7h (polystyrène) à 37h (thermos)

M2

Modèle local 1D radial

Formation de la croûte solide

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = (1/r) \partial / \partial r (r \cdot \lambda \cdot \partial T / \partial r)$$

Croûte de ~1 cm en 15 min
U chute de 450 → <50 W/m²·K
Nécessite un faisceau dense (34 m²)

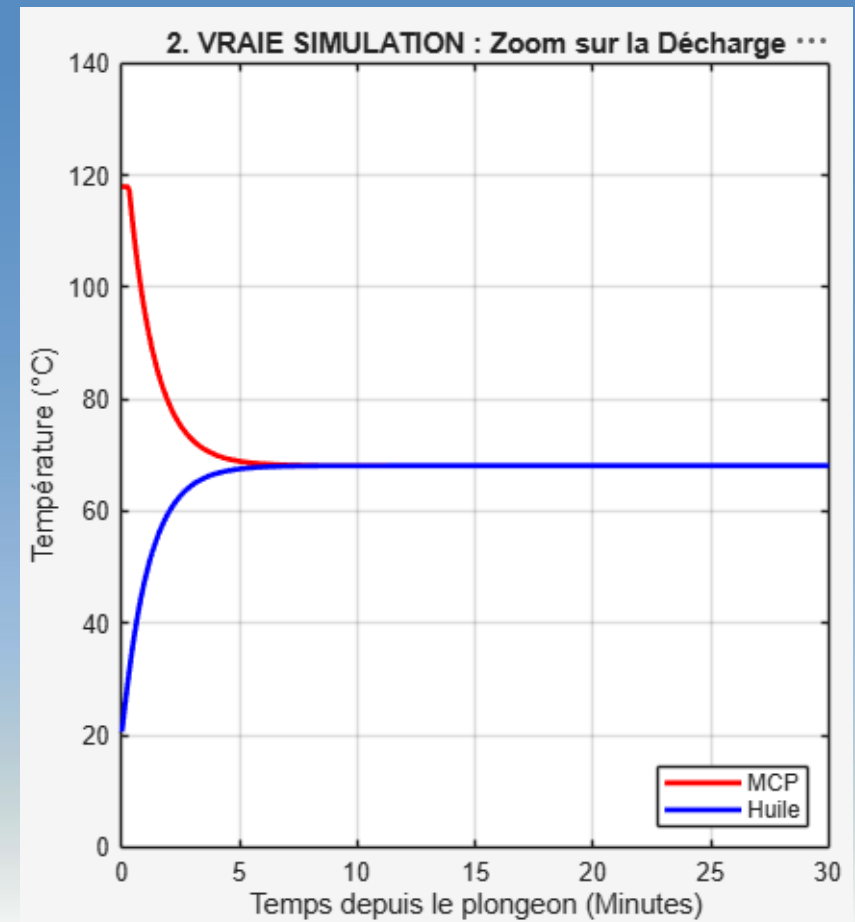
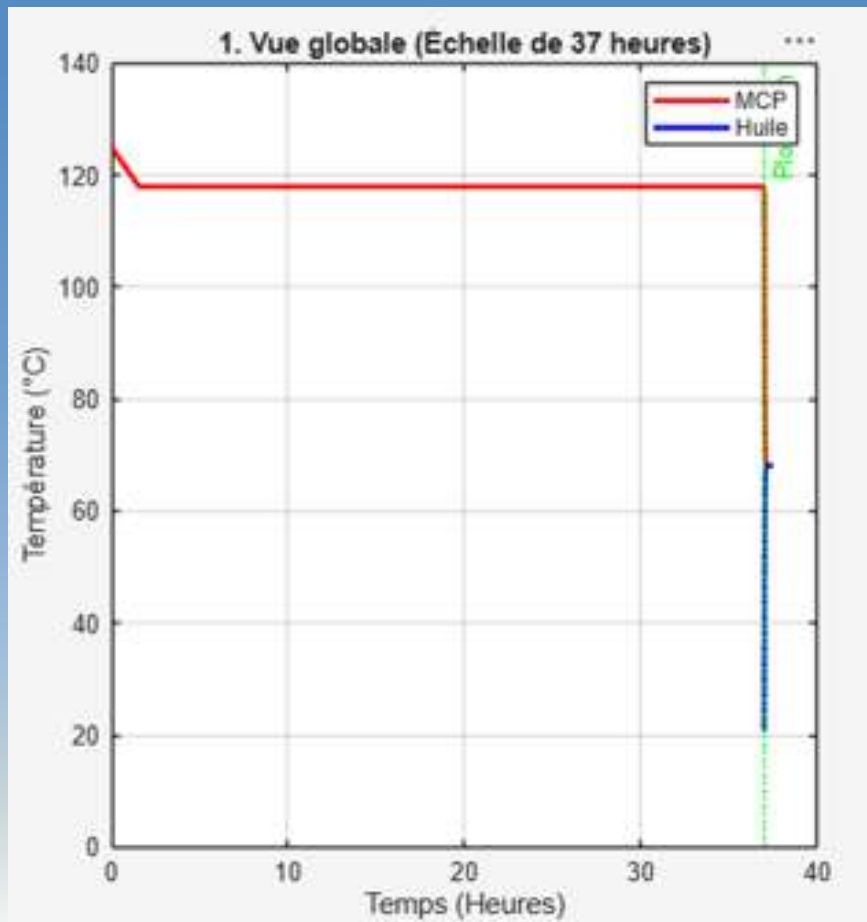
M3

Modèle macroscopique enthalpique

500 kg — batterie domestique

$$U.S = 400\text{ W/K (conductance globale)} \rightarrow 47\text{ kWh stockés (170MJ) pour un débit d'eau à } 0,2\text{ kg/s}$$

Palier thermique à 118°C validé
Décharge contrôlée sur 24h
Rendement : >90%



Trois modèles complémentaires ont été développés :

M1

Modèle énergétique simplifié

200 g d'érythritol

$$Q_{latente} = m \times L_f = 68\,000\text{ J}$$

Équivalent à chauffer 347 g d'huile de 20°C à 118°C
Stockage : 7h (polystyrène) à 37h (thermos)

M2

Modèle local 1D radial

Formation de la croûte solide

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = (1/r) \partial / \partial r (r \cdot \lambda \cdot \partial T / \partial r)$$

Croûte de ~1 cm en 15 min
U chute de 450 → <50 W/m²·K
Nécessite un faisceau dense (34 m²)

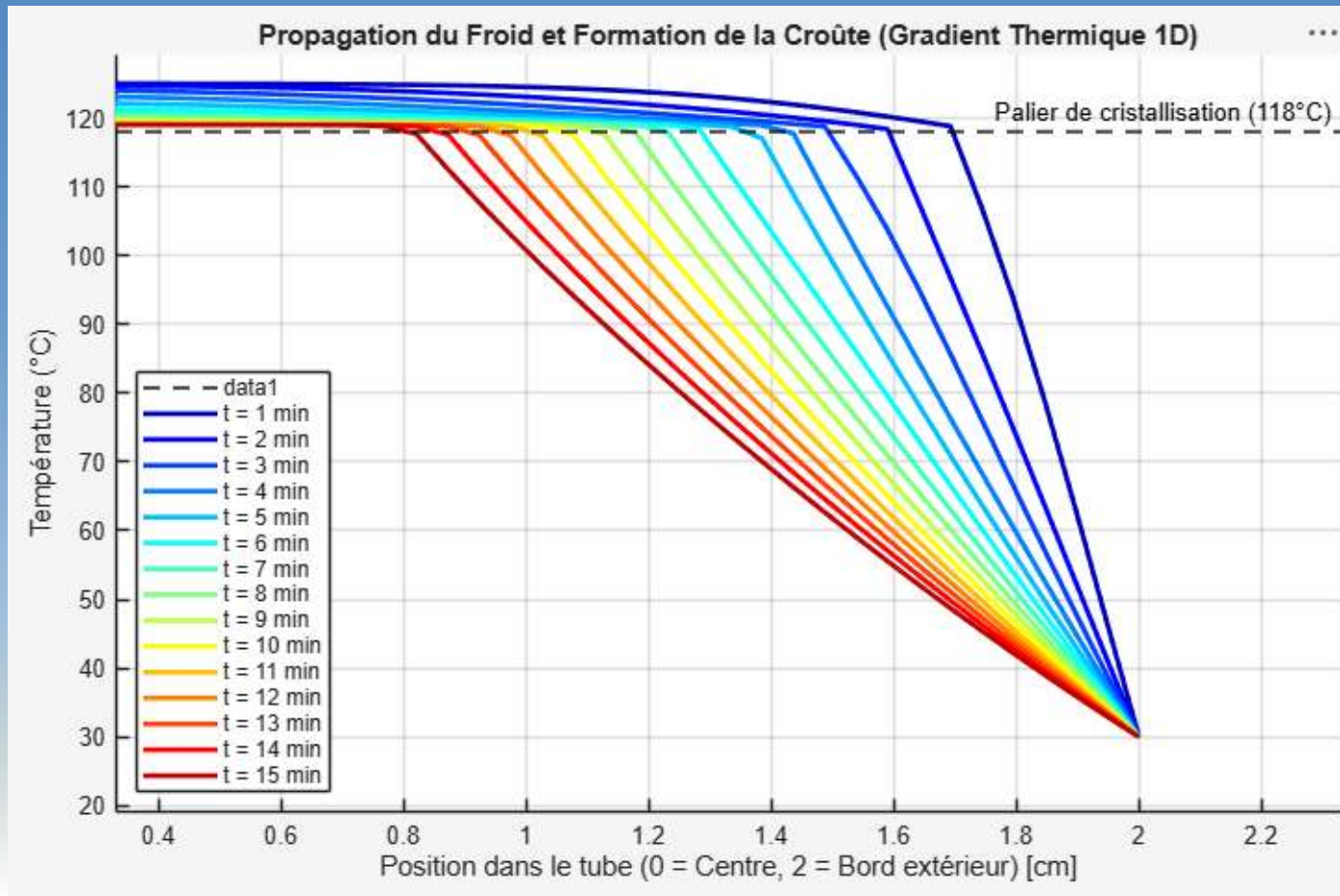
M3

Modèle macroscopique enthalpique

500 kg — batterie domestique

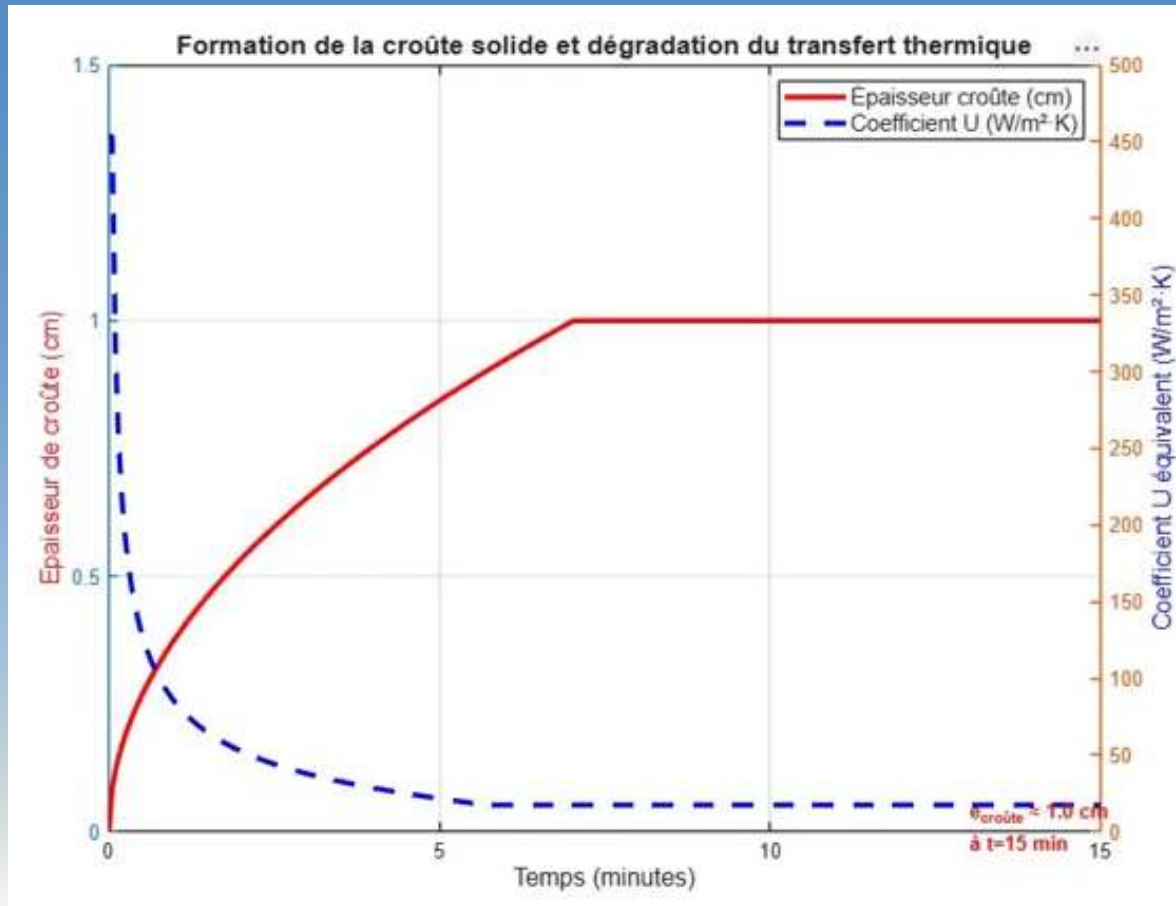
$$U.S = 400\text{ W/K (conductance globale)} \rightarrow 47\text{ kWh stockés (170MJ) pour un débit d'eau à }0,2\text{ kg/s}$$

Palier thermique à 118°C validé
Décharge contrôlée sur 24h
Rendement : >90%



À $t = 1$ min : chute brutale près de la paroi, cœur à 118°C

À $t = 15$ min : croûte de ~ 1 cm, énergie piégée au centre



U chute de 450 à $< 50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en quelques minutes
Solution : Multiplier la surface d'échange $\rightarrow$ faisceau tubulaire dense (34 m^2)

Trois modèles complémentaires ont été développés :

M1

Modèle énergétique simplifié

200 g d'érythritol

$$Q_{latente} = m \times L_f = 68\,000\text{ J}$$

Équivalent à chauffer 347 g d'huile de 20°C à 118°C
Stockage : 7h (polystyrène) à 37h (thermos)

M2

Modèle local 1D radial

Formation de la croûte solide

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = (1/r) \partial / \partial r (r \cdot \lambda \cdot \partial T / \partial r)$$

Croûte de ~1 cm en 15 min
U chute de 450 → <50 W/m²·K
Nécessite un faisceau dense (34 m²)

M3

Modèle macroscopique enthalpique

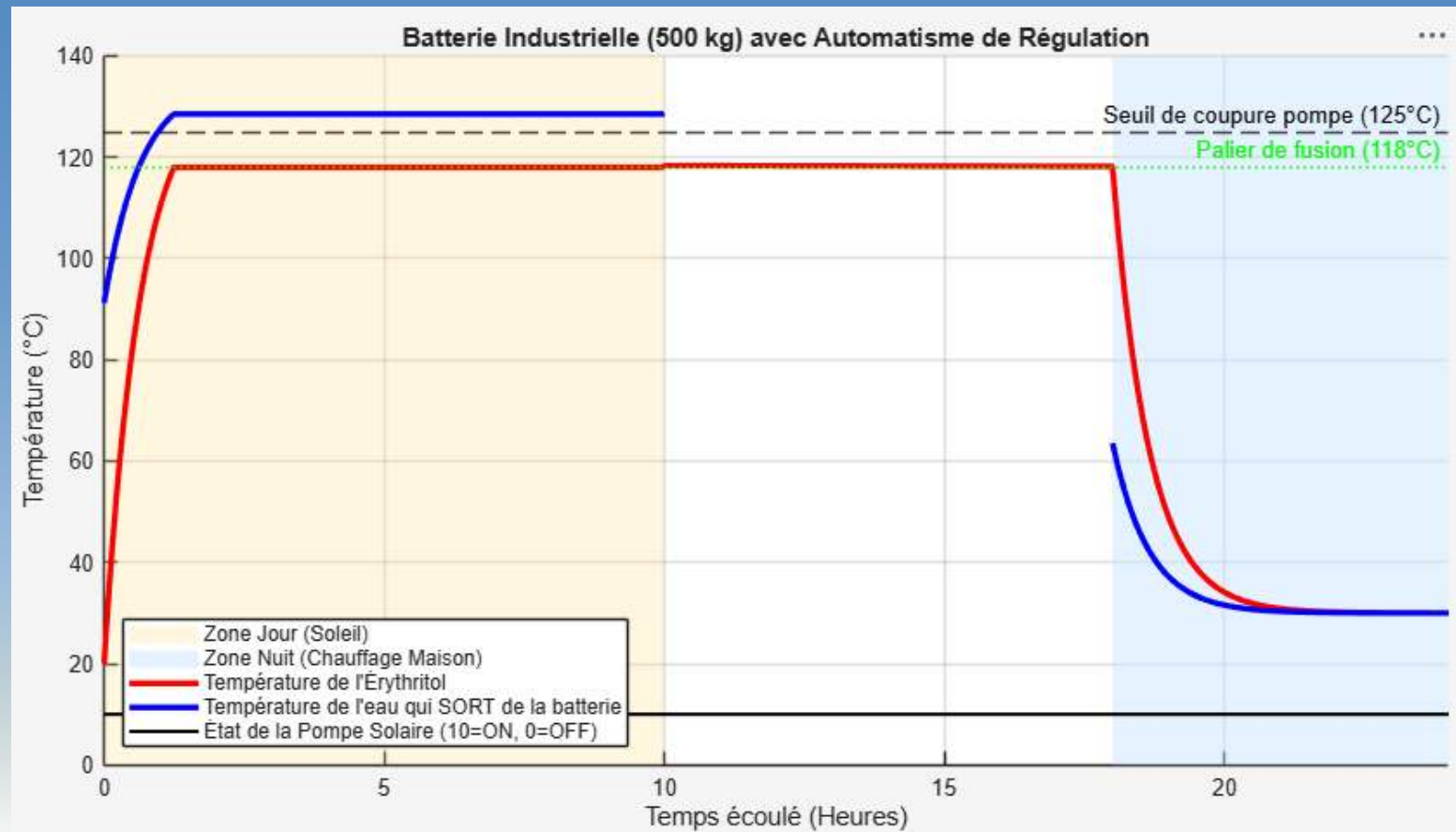
500 kg — batterie domestique

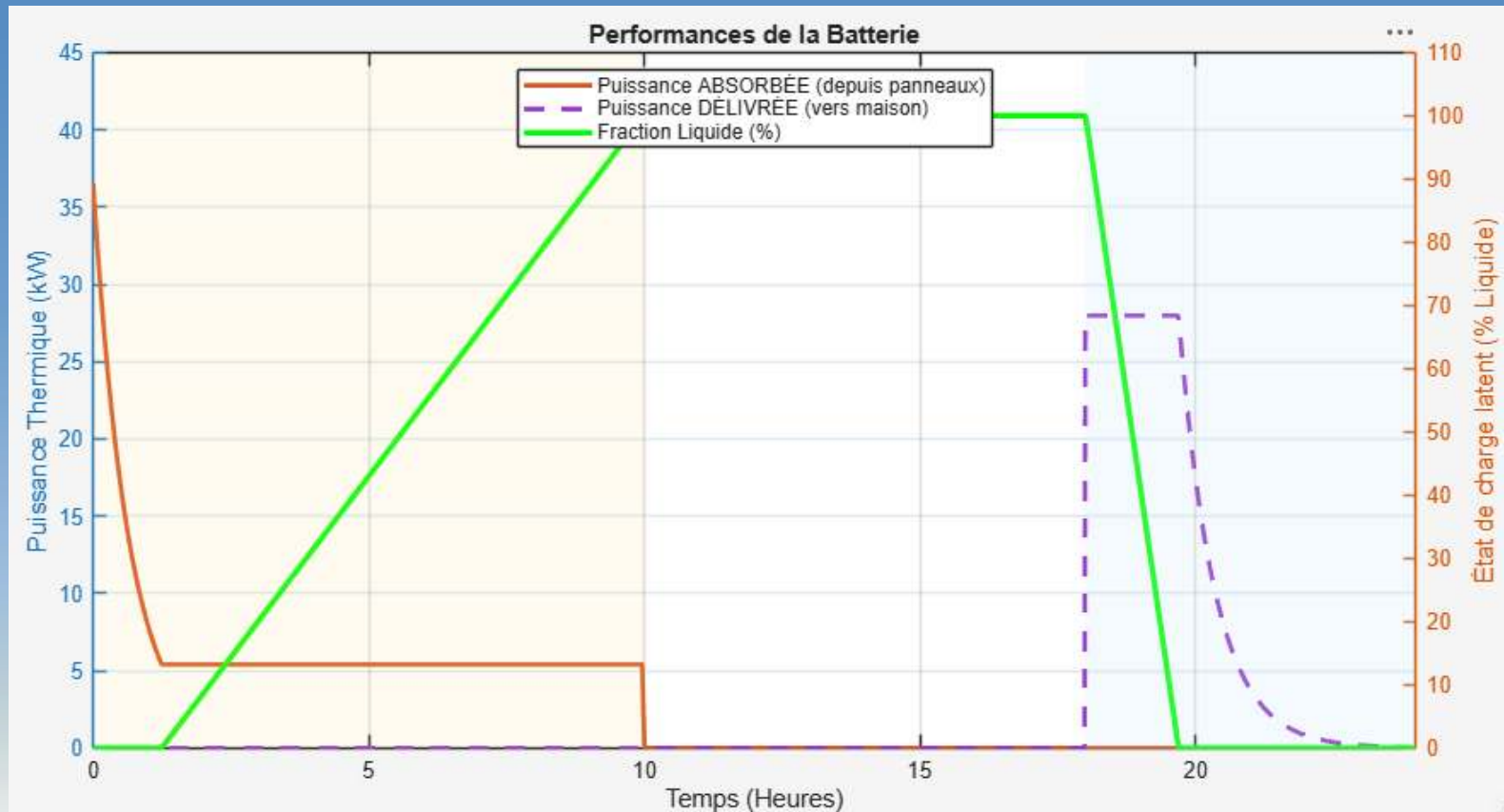
$$U.S = 400\text{ W/K (conductance globale)} \rightarrow 47\text{ kWh stockés (170MJ) pour un débit d'eau à } 0,2\text{ kg/s}$$

Palier thermique à 118°C validé
Décharge contrôlée sur 24h
Rendement : >90%

M3-Modèle macroscopique enthalpique

11





47

kWh

Énergie stockée
(500 kg érythritol)

5h40

Durée de décharge
à 12 kW (maison standard)

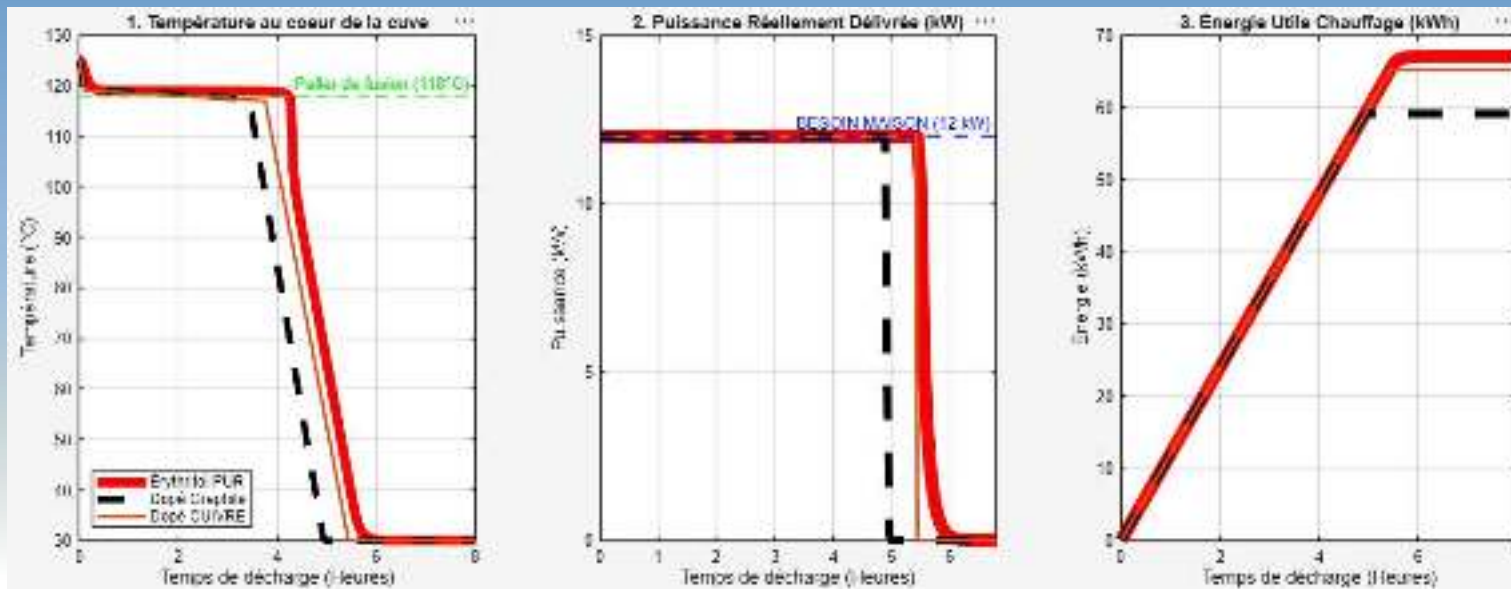
>90%

Rendement
énergétique global

305

tubes

Faisceau tubulaire
(cuve 1m × 1m)

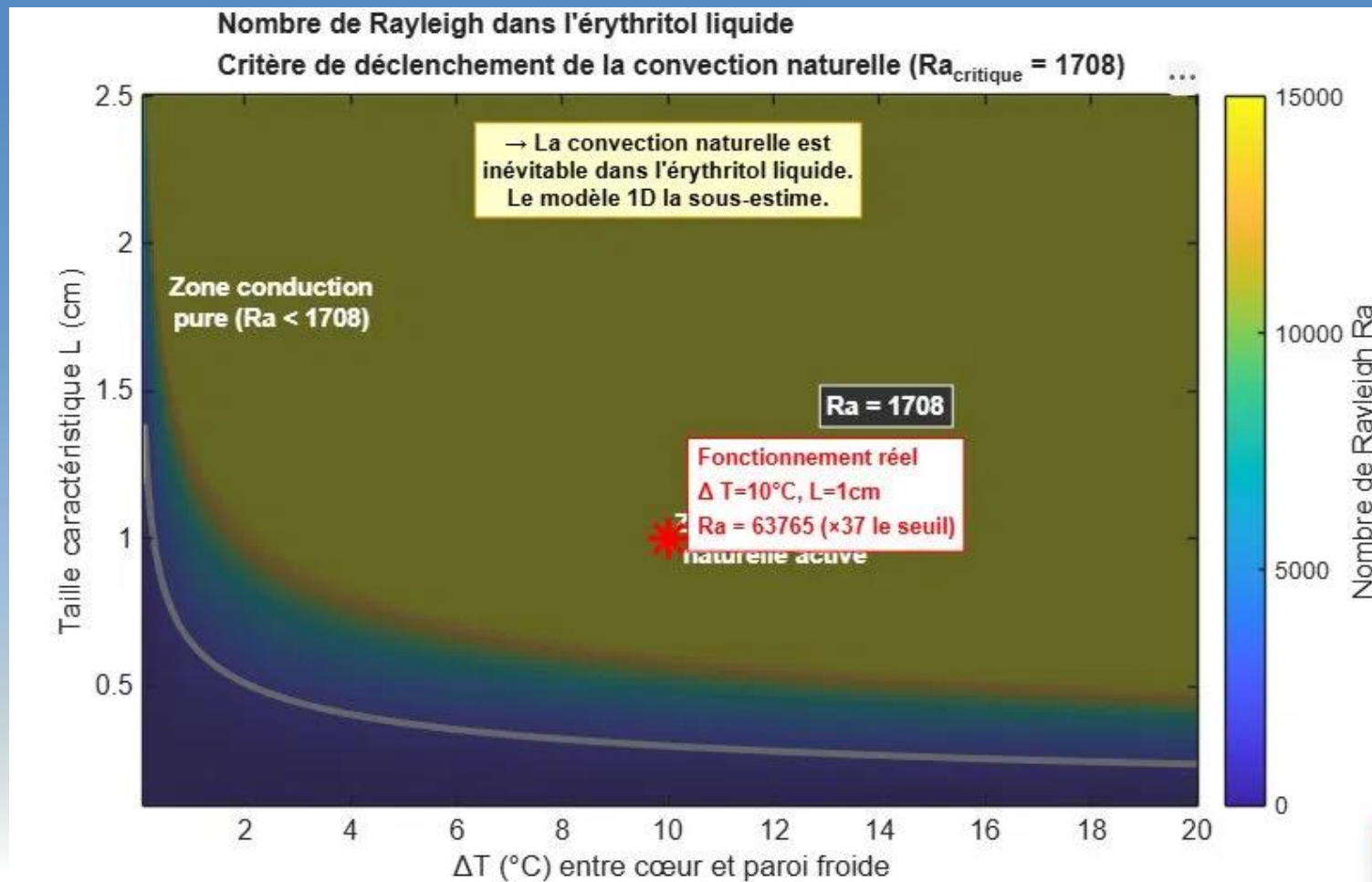


Conclusion clé

L'érythritol pur surpasse les versions dopées (graphite, cuivre) grâce à la surface d'échange.

Le dopage réduit la fraction de MCP actif = moins d'énergie stockée.

→ Un échangeur bien dimensionné (34 m²) compense la faible conductivité sans dopage.

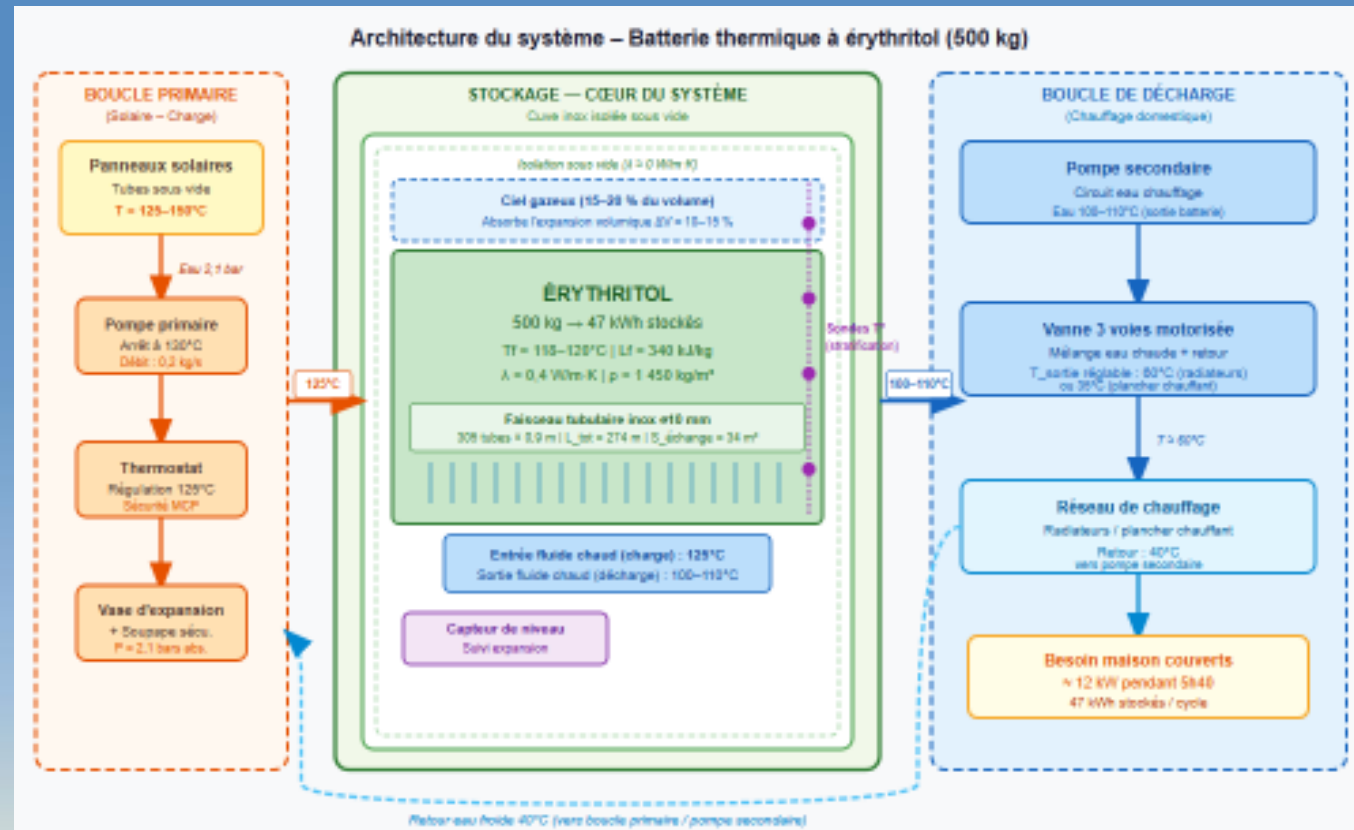


Géométrie du faisceau tubulaire :

- Longueur totale : 274 m de tubes
- Nombre de tubes : 305 (longueur unitaire 0,9 m)
- Surface d'échange : 34 m²
- Dimensions cuve : $\varnothing \approx 1$ m, hauteur 1 m

Calculs d'ingénierie :

- Pression requise : 2,1 bars (Clausius-Clapeyron)
- Nombre de Reynolds : 13 666 (régime turbulent)
- Coefficient h : 3 500 W/m²·K
- Puissance pompe : ~50 W



Faible conductivité

Cause : $\lambda = 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Impact : Croûte solide isolante → décharge lente

→ Faisceau dense 34 m² ou dopage

Surfusion

Cause : Instabilité thermodynamique

Impact : Retard de solidification

→ Agents nucléants (poudre de sucre)

Expansion volumique

Cause : $\Delta V = 10\text{--}15\%$ à la fusion

Impact : Risque de rupture de l'enceinte

→ Ciel gazeux 15–20% de volume

Dégradation thermique

Cause : $T > 130^\circ\text{C}$ → caramélisation

Impact : Perte de capacité

→ Régulation stricte à 125°C

Hypothèses simplificatrices : masse homogène ($Bi \gg 1$!), adiabaticité, pas de surfusion, conduction 1D. → Validation expérimentale nécessaire.

Échelle	Masse	Énergie	Durée Stockage	Puissance	T Restitution
Maquette	200 g	68 kJ	7h–37h	—	105–118°C
Domestique	500 kg	47 kWh	24h	12 kW (5h40)	100–110°C
Industriel	1 t	94 kWh	Plusieurs jours	20–50 kW	100–110°C

CONCLUSION & PERSPECTIVES

"L'érythritol permet un stockage thermique compact et efficace, mais son industrialisation nécessite de repenser l'échangeur pour surmonter sa faible conductivité. Les simulations montrent que c'est possible, à condition d'accepter un compromis entre performance et coût."

Points validés

- Intérêt thermodynamique confirmé (3–4× plus compact)
- Batterie 500 kg → 47 kWh stockés (maison standard)
- Rendement >90% avec isolation sous vide
- Simulation du comportement de la croûte solide
- Dopage non nécessaire si échangeur bien dimensionné

Perspectives (L2 → Industriel)

Court terme : maquette 200 g, DSC, protocole expérimental

Moyen terme : prototype 20–50 kg, faisceau tubulaire

Long terme : optimisation coût/performance, 10 000 cycles

Applications potentielles :

Bâtiment : chauffage & ECS | Industrie : chaleur fatale | Réseaux de chaleur urbains | Décarbonation du secteur thermique

Un projet simple, concret et engagé pour un avenir plus durable 