

Torréfaction du café par énergie solaire concentrée : modélisation physique et résultats expérimentaux

François VEYNANDT, Juan-Pablo PEREZ PANDURO, Julien DELCOL, Luis-Miguel HADZICH,
Sandra VERGARA, Miguel HADZICH

Pontificia Universidad Católica del Perú ; Grupo de Apoyo al Sector Rural, Lima, Perú

Université de Toulouse ; Mines Albi ; CNRS; Centre RAPSODEE, Albi, France

Università di Corsica Pasquale Paoli, BP 52 - 20250 Corte, France

*francois.veynandt@mines-albi.fr, jp.00perez@gmail.com, delcol.julien@live.fr, lmhadzich@pucp.pe,
sandra.vergara@pucp.pe, mhadzic@pucp.edu.pe*

Résumé : La production de café est une activité importante du secteur rural au Pérou. Torréfier une partie du café dans la zone de production améliorerait les revenus de la population locale. Dans le cadre du développement d'un torréfacteur de café à énergie solaire concentrée pour le secteur rural, nous proposons un modèle physique du système pour étudier son comportement et proposer des améliorations.

Le modèle optique, simulé par lancer de rayon, permet d'évaluer le rendement optique de différentes géométries. Le modèle thermique analytique établit un bilan énergétique macroscopique du torréfacteur. La répartition des pertes est ainsi évaluée. L'évolution de la température du café au cours de la torréfaction, observée lors des expérimentations, est décrite correctement par le modèle.

Les caractéristiques conseillées du système permettent de torréfier 1 kg de café vert en 24 minutes sous 735 W/m^2 . Des pistes d'amélioration sont données.

Mots clés : Energie solaire concentrée, Modèle optique, Modèle thermique, Torréfaction (aliment), Café, Cuisson solaire

1. Introduction

1.1. Contexte

Le café est le produit agricole d'exportation le plus important au Pérou. Pour permettre aux producteurs de vendre leur produit avec une plus grande valeur ajoutée, nous proposons une technologie simple, robuste, économique et écologique. L'objectif visé avec cette technologie libre de droit est d'améliorer la qualité de vie des populations rurales.

La cuisson solaire est déjà bien répandue dans des régions ensoleillées du monde. Avec un concentrateur solaire de type Scheffler, nous pouvons atteindre facilement 300 à 400 °C. La torréfaction, qui ne nécessite que 200 °C, est donc une application possible.



Figure 1 : gauche : Torréfacteur solaire lors d'une campagne de tests à Huyro, Pérou
centre: Gros plan sur le tambour, au foyer du concentrateur Scheffler, pendant la torréfaction
droite : géométrie du tambour de torréfaction

1.2. Principe du torréfacteur solaire

Le concentrateur de Scheffler est une portion de parabole, qui concentre le rayonnement en un foyer fixe, par un suivi sur un axe [1]. Au foyer, le système de torréfaction consiste en un tambour rotatif, avec releveurs, afin d'assurer une bonne homogénéité du degré de torréfaction du café. Le tambour est ouvert à une extrémité, ainsi le rayonnement entre directement dans la cavité pour chauffer le café. Le choix de ne pas utiliser de vitre a

été fait notamment du fait du contexte d'application pour le secteur rural. C'est également par cette ouverture que la vapeur d'eau et les fumées s'échappent. La figure 1.g montre une vue d'ensemble du dispositif et, en figure 1.c, un gros plan sur le foyer du concentrateur, en cours de torréfaction. Le tambour peut être légèrement incliné vers le haut pour permettre un taux de remplissage plus important en café (voir $m_{c,max}$ tableau 1). La figure 2 présente un schéma de la structure mécanique qui porte le tambour de torréfaction.

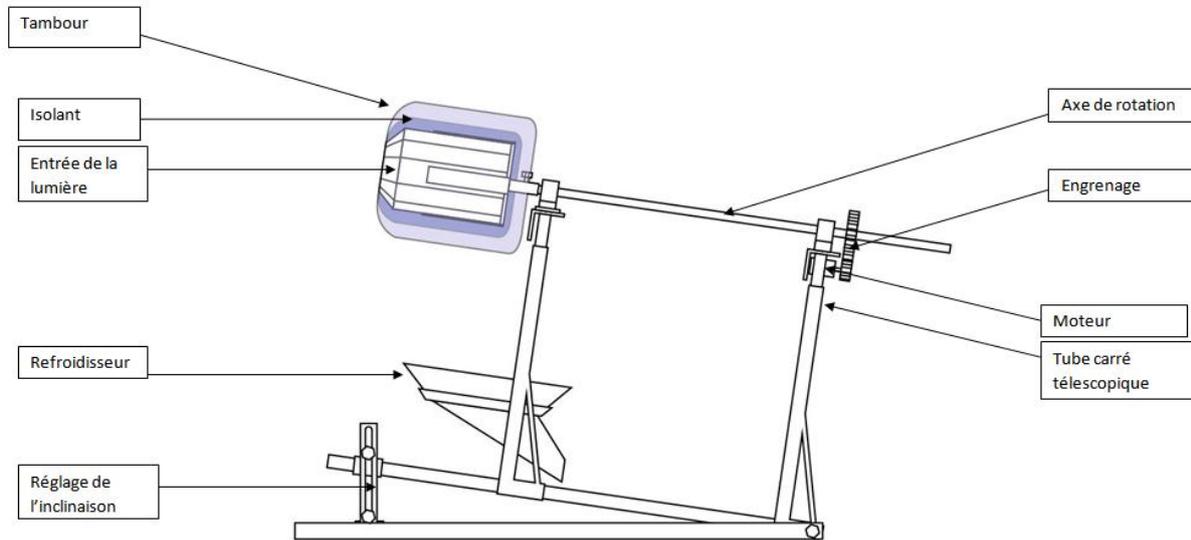


Figure 2 : Schéma de montage du tambour sur sa structure mécanique

2. Modèle physique

Pour orienter les choix techniques et améliorer la technologie, nous avons développé un modèle physique du torréfacteur, avec : une simulation optique et un bilan énergétique.

2.1. Propriétés du modèle

Les paramètres géométriques du modèle sont présentés dans le tableau 1 et définis par la figure 1.d. Trois dimensions de tambour sont étudiées. Le concentrateur Scheffler, de $2,7 \text{ m}^2$ de surface de miroirs, est modélisé par une portion de parabole, définie dans le tableau. Les erreurs optiques sont prises en compte.

Tableau 1 : Géométrie du tambour et du concentrateur parabolique

Tambour	D_{cav} (m)	L_{cav} (m)	V_{cav} (L)	$m_{c,max}$ (kg de café vert)	
				horizontal	incliné à 20°
Grand	0,36	0,28	17,3	1	$\geq 1,5$
Moyen	0,25	0,275	12,0	0,5	1,5
Petit	0,2	0,23	7,2	0*	0,5

Parabole $Z(x, y) = (x^2 + y^2)/(4f)$ de distance focale : $f = 0,8 \text{ m}$				
Coins de la section rectangulaire considérée:				
x (m)	0,59	-0,59	-0,59	0,59
y (m)	2,25	2,25	0,66	0,66

* jusqu'à 1 kg avec une vitre pour fermer le tambour.

Les propriétés des matériaux sont résumées dans le tableau 2 : propriétés optiques et thermiques des parois réfléchissantes et de l'isolant [2,3].

Tableau 2 : Propriétés des matériaux

Matériau	ρ (-)	τ (-)	α_{sol} (-)	ϵ_{ir} (-)	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Miroirs	0,8				
Acier inox réfléchissant	0,6		0,4	0,08	40
Acier inox altéré sous fort flux solaire	0,4		0,6	0,85	40
Coton					0,06

La transformation irréversible du café au cours de la torréfaction est prise en compte par l'évolution de ses propriétés physiques, en particulier sa couleur et sa capacité thermique. On peut relier les propriétés du café à sa température à condition que celle-ci augmente continûment (si elle chute momentanément, les propriétés sont supposées inchangées). Le tableau 3 définit les relations, dont certaines sont bornées [4, 5, 6].

Tableau 3 : Propriétés du café, évolution au cours de la torréfaction reliée à sa température T_c

Café	initial	Fonction de T_c ($^{\circ}\text{C}$), valide pour $20^{\circ}\text{C} < T_c < 250^{\circ}\text{C}$	final
Absorptivité (-)	0,55	$\alpha_c(155^{\circ}\text{C} < T_c) = 0,44 \cdot T_c + 12,8$ (1)	
Perte de masse du café (% kg perdu/kg café vert initial)	0	$dm_c(T_c) = 0,2192 \cdot T_c - 30,399$ (2)	
Masse volumique (kg/m^3)	1120	$\rho_c(T_c) = -5,667 \cdot T_c + 1744$ (3)	
Teneur en humidité (%)	8,91	$X_c(T_c) = -0,0789 \cdot T_c + 18,092$ (4)	2
Capacité thermique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)		$Cp_c(T_c) = \frac{1099 + 7 \cdot T_c + 5000 \cdot \frac{1}{100} X_c}{1 + \frac{1}{100} X_c}$ (5)	

Les coefficients de convections sont évalués par des corrélations. A titre indicatif, les valeurs de h sont données pour une température de cavité de $T_{cav} = 200^{\circ}\text{C}$ et une température ambiante de $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$:

- La convection autour du tambour est évaluée [7] :
 - sans vent, par la corrélation de Churchill et Chu pour la convection naturelle autour d'un cylindre ($h_{ext} = 4,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
 - avec vent, par la corrélation de Whitaker pour la convection forcée ($h_{ext} = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ pour 10 m/s de vitesse de vent).
- La convection par l'ouverture de la cavité du tambour est évaluée par la corrélation de Leibfried et Ortjohann, pour les cavités tournées vers le haut ou vers le bas [8] ($h_{ap} = 7,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

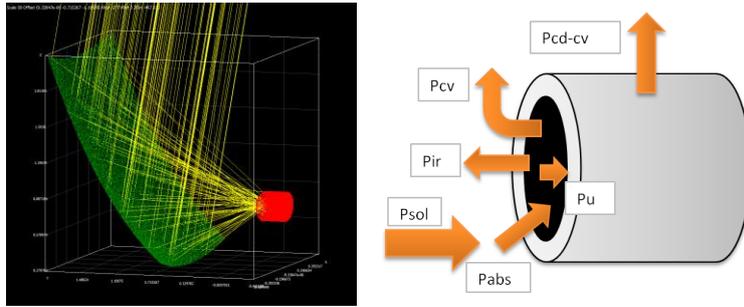


Figure 3 : gauche : Vue de la simulation optique du concentrateur et du tambour avec le logiciel SolTrace
droite : schéma de principe du bilan énergétique du système

2.2. Bilan énergétique du système

2.2.1. Aspects optiques

Le comportement optique est modélisé avec le logiciel de lancer de rayon SolTrace [9]. La figure 3.g montre une visualisation de la géométrie simulée du concentrateur solaire et du torréfacteur. Ce modèle permet d'évaluer la puissance thermique P_{abs} absorbée par le tambour et le café, à partir de la densité de puissance solaire incidente P_{sol} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) :

$$P_{abs} = \eta_o P_{sol} \quad (6)$$

Le rendement optique η_o du système dépend de : (i) la géométrie, avec notamment l'orientation du concentrateur (dont la surface utile dépend de la date), (ii) la réflectivité des miroirs, (iii) les pertes par débordement autour de la cavité, (iv) l'absorptivité du café et celle de la paroi interne du tambour.

2.2.2. Bilan énergétique

Les transferts thermiques sont modélisés de manière analytique et macroscopique, voir le schéma 3.d :

- P_{ir} : la puissance perdue par rayonnement à l'ouverture du tambour

$$P_{ir} = \varepsilon_{ir,cav} S_{ap} \sigma (T_{cav}^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

- P_{cv} : la puissance perdue par convection à l'ouverture du tambour

$$P_{cv} = h_{ap} S_{cz} (T_{cav} - T_{amb}) \quad (8)$$

- P_{cd-cv} : la puissance perdue par conduction à travers la paroi, puis convection avec l'environnement

$$P_{cd-cv} = \left(\frac{e}{k_{cot} S_{cd}} + \frac{1}{h_{ext} S_{ext}} \right)^{-1} (T_{cav} - T_{amb}) \quad (9)$$

- P_u : la puissance thermique utile qui chauffe le café :

$$P_u = P_{abs} - (P_{ir} + P_{cv} + P_{cd-cv}) \quad (10)$$

Ce bilan énergétique nous donne ainsi la répartition des puissances dans le système, donc son rendement.

3. Résultats

Le modèle physique proposé permet d'étudier : (i) la distribution du flux solaire dans le tambour, (ii) la température maximale (stagnation) pour une configuration donnée, (iii) la répartition des puissances dans le torréfacteur, en particulier la puissance utile transférée au café, (iv) la durée de torréfaction pour une configuration donnée, (v) le profil d'évolution de la température au cours de la torréfaction.

3.1. Résultats optiques

Avec un rayonnement solaire direct de 800 W/m^2 , le concentrateur de Scheffler délivre environ 1000 W de puissance thermique au point focal, soit un rendement optique de l'ordre de 50%. Avec les géométries proposées, plus le tambour est gros, plus le rayonnement sera absorbé sur la paroi du fond. Un cône placé au fond limite les pertes par réflexion vers l'extérieur et répartit mieux le rayonnement sur les parois du tambour.

Il est possible de torréfier avec un ensoleillement direct de 500 W/m^2 , voire moins, à condition que la température de stagnation à vide atteigne 140 °C . En effet, le café changeant de couleur à partir de cette température, l'augmentation est suffisante pour permettre la torréfaction.

3.2. Exemple de résultats expérimentaux

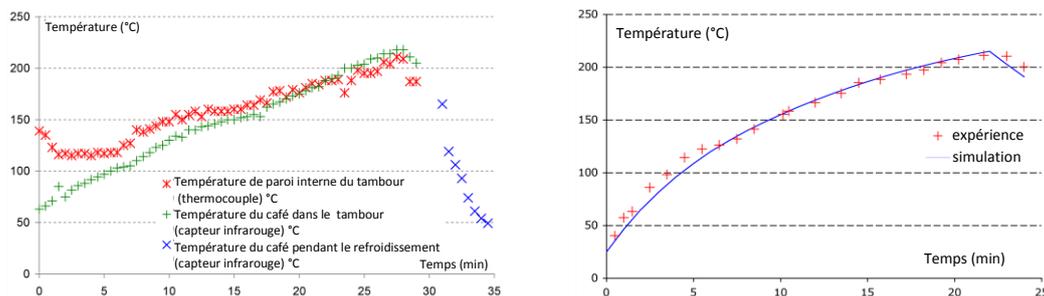
Parmi les campagnes de mesures, une a été menée dans un village producteur de café des Andes. La figure 4.g rapporte la mesure de la température de paroi interne du torréfacteur par un thermocouple et du café par un thermomètre infrarouge ($\epsilon = 0,95$). La température interne baisse dans les premières minutes, du fait de l'introduction du café dans le tambour préchauffé. Ensuite, l'augmentation en température maintient son rythme aux plus hautes températures du fait du brunissement du café, qui augmente l'absorptivité. A la fin de la torréfaction, le café est refroidit en 5 minutes à 50 °C , pour stopper les réactions chimiques.

3.3. Comparaison des résultats de simulations aux résultats expérimentaux

Comme le montre la figure 4.d, on obtient un bon accord entre la simulation numérique et les résultats expérimentaux. La description des phénomènes physiques qui régissent la torréfaction semble donc satisfaisante.

La torréfaction de 1 kg en 24 minutes est ici obtenue sous 735 W/m^2 , sans vent et à $T_{amb} = 25 \text{ °C}$. L'ajustement des courbes est le meilleur avec un rendement optique de 38 %. Dans d'autres expériences, le rendement optique atteint jusqu'à 50 %. Le réglage du concentrateur a une influence importante.

L'analyse de répartition des puissances révèle qu'à 200 °C , la puissance utile représente 28 % de la puissance absorbée par le tambour. Les pertes par convection à l'ouverture correspondent à 55%, les pertes par infrarouge à 5% et les pertes par conduction à travers la paroi à 12 %. Le rendement thermique du torréfacteur baisse, à mesure que la température monte. En fin de torréfaction, avec 28 % de rendement thermique et 50 % de rendement optique, le rendement global atteint son minimum à 14 % environ. En pratique, les réactions chimiques exothermiques de la torréfaction, négligées dans la simulation, soutiennent la montée en température.



3.4. Configuration conseillée

En comparant les résultats expérimentaux et ceux des simulations obtenus pour des tambours de tailles et matériaux différents, on détermine une configuration privilégiée. Le tambour de taille intermédiaire constitue un bon compromis : avec 25 cm de diamètre, 27,5 cm de profondeur et une ouverture de 20 cm de diamètre. Il permet de torréfier 1 kg de café vert, en inclinant le tambour de 15 ° vers le haut, et jusqu'à 1,5 kg de café vert, avec 19 ° . L'inclinaison du tambour renforce les pertes thermiques par convection dans une proportion qui reste acceptable. Pour limiter les pertes thermiques, le tambour est isolé de 5 cm d'épaisseur de tissu recyclé.

L'utilisation d'une cavité ouverte est un choix fort, mais la fermeture par une vitre réduit l'apport solaire et l'évacuation de l'humidité et des gaz de torréfaction nécessite une ouverture dans tous les cas. Les risques et difficultés de se procurer une vitre adaptée encouragent à étudier le système dans sa configuration la plus simple.

Une approche alternative pourrait être étudiée, sur la base d'un tambour aéré, placé dans un caisson isolé fixe, avec une ouverture dirigée vers le bas.

Conclusion et perspectives

Le modèle physique établi apporte des éléments d'analyse complémentaire aux expérimentations pour étudier le comportement du torréfacteur. Le travail aboutit à conseiller une configuration avec le tambour de taille intermédiaire, isolé, incliné pour torréfier 1 kg de café à la fois.

Cette technologie libre de droit continue d'être développée, avec des améliorations du concept et la perspective d'un passage à l'échelle supérieure. La technologie permettra à des artisans de pratiquer la torréfaction solaire de café, mais aussi d'autres produits comme le cacao, les fèves, le maïs... Les perspectives sont d'autant plus intéressantes que le concentrateur Scheffler peut servir à d'autres applications : cuisson, distillation, pasteurisation, vapeur...

Nomenclature

Symbole		ρ	réflectivité, -
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	σ	constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$
D	diamètre, m	τ	transmittivité, -
dm	perte de masse		
e	épaisseur, m	Indices	
f	distance focale, m	abs	absorbé
h	coefficient de transfert convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ap	ouverture du tambour
L	longueur, m	cav	cavité, intérieur du tambour
k	conductivité thermique, $W/m.K$	cd	conduction
m	masse, kg	cv	convection
P	puissance, W	cz	zone convective équivalente
S	surface, m^2	c	café
T	température, K ou $^{\circ}C$	cot	coton
V	volume, m^3	ir	infrarouge
X	teneur en humidité, %	o	optique
x, y, Z	coordonnées de la parabole, m	u	utile
Symboles grecs		sol	solaire
α	absorptivité, -	amb	ambient, environnement
ε	émissivité, -	ext	externe
η	rendement, -		

Références

- [1] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, Design principle and calculations of a scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *Solar Energy* 84 (8), pages 1490–1502, Août 2010.
- [2] E.W. Spisz, A.J. Weigand, R.L. Eberman, J.R. Jack, *SOLAR ABSORPTANCES AND SPECTRAL REFLECTANCES OF 12 METALS FOR TEMPERATURES RANGING FROM 300 TO 500 K*, Tech. rep., Lewis Research Center, National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, Ohio, Mai 1969.
- [3] J.R. Howell, R. Siegel, M.P. Mengüç, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th Edition. CRC PressINC, 2010.
- [4] *NTC2442: CAFÉ TOSTADO EN GRANO Y/O MOLIDO. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE TOSTIÓN*, Norme Technique Colombienne, Fév. 2004.
- [5] Y.A. Pietro Duarte, *Caracterización física de café semitostado*, Tech. rep., Bogota, 2002.
- [6] L. Alessandrini, S. Romani, G. Pinnavaia, M. D. Rosa, *Near infrared spectroscopy: An analytical tool to predict coffee roasting degree*, *Analytica Chimica Acta* 625 (1), pages 95–102, Sep. 2008.
- [7] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Edition. John Wiley and Sons (WIE), Août 2001.
- [8] U. Leibfried, J. Ortjohann, *Convective heat loss from upward and downward-facing cavity solar receivers : measurements and calculations*. *Journal of solar energy engineering* 117 (2), pages 75–84, Mai 1995.
- [9] National Renewable Energy Laboratory, USA, 2012. NREL: concentrating solar power research - SolTrace home page. <http://www.nrel.gov/csp/soltrace/>.