

Analyse technico-économique d'un séchoir à chauffage partiellement solaire pour Plantes Aromatiques et Médicinales (PAM)

N.Benaouda, B.Zeghmati*, X. Chesneau*

CDER, BP. 62 Route de l'Observatoire Bouzaréah - Alger, Algérie

n_benaouda@cder.dz

() Université de Perpignan 52, LAMPS-GME, avenue Paul Alduy 66860 Perpignan, France*

zeghmati@univ-perp.fr

Résumé : Une étude technico-économique d'un séchoir modulaire à chauffage partiellement solaire est présentée. Les équations de transfert déduites de l'analogie entre les transferts de chaleur et les transferts électriques sont résolues par une méthode implicite aux différences finies et l'algorithme Diabolo- Sablier. Les données météorologiques et radiométriques basées sur la notion de journée type utilisées dans nos simulations sont celles d'Alger (Algérie). L'analyse économique consiste à la recherche d'un optimum monétaire du coût de séchage montre que le temps de retour de ce séchoir est de 2 ans pour un bénéfice cumulé égale à 13 fois son coût initial.

Mots clés : couverture solaire, insolateur, séchage, feuilles de menthe, séchoir, analyse économique

1. Introduction

Le séchage est l'une des méthodes de conservation des produits agroalimentaires par diminution de leur teneur en eau jusqu'à des valeurs résiduelles où le développement de tout micro-organisme est inhibé. Au cours du séchage de plantes aromatiques et médicinales, la température de l'air asséchant doit être maintenue au-dessous de 50°C [1] pour éviter des modifications de la structure physico-chimique du produit et donc la détérioration de sa qualité [2]. Pour assurer le développement des systèmes de séchage solaire, les études thermo-énergétiques sont généralement complétées par des analyses de faisabilités technico-économique [3]. Les modèles d'analyse technico-économiques sont basés sur le même principe mais doivent être adaptées à chaque type de séchoir afin de prendre en compte leurs spécificités. Ainsi, pour un système de séchage solaire pour fruits et légumes à usage domestique dont la durée de vie est estimée à 20 ans, la période d'amortissement est de l'ordre de 6 mois [4]. Pour une même durée de vie, la période d'amortissement d'un séchoir solaire hybride pour le séchage des tomates dans la région du Sahara algérien septentrional est de 1.27 ans [5]. L'optimisation d'un séchoir solaire pour céréales, assimilées à un milieu poreux, a mis en évidence les principaux paramètres qui influencent le coût de séchage, à savoir : la période d'utilisation annuel du séchoir, le cout spécifique de l'insolateur, le débit d'air et l'aire des insolateurs [6]. L'optimisation de ce système de séchage est basée sur la recherche des conditions de séchage (débit d'air asséchant, température de l'air asséchant, ..) pour lesquelles la couverture solaire est maximale. Une comparaison des performances d'un séchoir solaire modulaire passif pour maïs fonctionnant en mode mixte (le produit est à la fois soumis au flux solaire et à un écoulement d'air) ou indirect (le produit n'est pas soumis au flux solaire) a montré qu'une longueur d'insolateur égale à 1.8 m est suffisante pour assurer le séchage de 90 kg de produit pour un séchoir fonctionnant en mode mixte. Elle passe à 3.34m pour un séchoir fonctionnant en mode indirect [7]. Pour le séchoir fonctionnant en mode mixte, le cout énergétique du séchage est réduit de 26% par rapport à celui du séchoir indirect. Une analyse technico-économique d'un séchoir solaire modulaire pour denrées agroalimentaires fonctionnant en convection forcée basée sur la minimisation des couts de séchage a permis de déterminer l'aire optimale des insolateurs [8]. Ainsi, pour cette aire, les rendements moyens de l'insolateur et du séchoir sont respectivement égaux à 44% et 16% et la couverture solaire moyenne est de 33% pour une utilisation annuelle de 303 jours du séchoir. Il ressort de ces quelques travaux que l'analyse technique d'un projet de séchoir au moment de son étude s'attache à identifier et analyser en détail notamment, la qualité du site sélectionné; le type des équipements choisis, la performance thermique et l'investissement. Elle va ainsi permettre d'identifier les valeurs optimales des paramètres retenus comme indicateurs techniques (température de séchage, débit, taux de recyclage et l'humidité relative de l'air asséchant, coût de l'énergie d'appoint, ...) pour réaliser une analyse technico-économique du fonctionnement du système de séchage. Le présent travail est consacré à une optimisation du fonctionnement d'un système de séchage modulaire pour plantes aromatiques et médicinales (PAM). Elle est basée sur la méthode des analogies électriques, la courbe caractéristique de séchage de la menthe et une analyse sommaire de la faisabilité technico-économique de ce séchoir.

2. Matériels et méthodes

2.1 Matériels

le système de séchage est composé d'une armoire de section rectangulaire (0.8 x 1.6m) dans laquelle sont disposées cinq claies, un insolateur plan à air, un ventilateur centrifuge (type NICOTRA GEBHARDT, débit max 3800 m³ h⁻¹) et un dispositif de chauffage auxiliaire (résistance électrique à ailettes de puissance 4kw) équipée d'un thermostat électronique digital à microprocesseur (TDL 51 avec une sortie à relais 8A et une entrée pour sonde de température NTC) (fig.1). Chaque claie peut recevoir une quantité de produit équivalent à une masse de 5 kg. A la sortie de l'insolateur, l'air est acheminé à travers un conduit de section circulaire (φ = 90 mm) à la partie inférieure de la chambre de séchage et s'écoule par convection forcée vers la partie supérieure du séchoir. La température de l'air est ajustée à une température constante T_{sech}, avec le dispositif de chauffage auxiliaire. Lorsque l'humidité relative de l'air à la sortie du séchoir est suffisamment faible, une fraction de cet air est recyclé à travers le séchoir en le mélangeant avec l'air chauffé par l'insolateur.

Tableau 1 : Paramètres clés du système de séchage solaire

Paramètres	unité	valeur
Insolateur	Surface	2 m ²
Capacité de séchage	Kg/cycle	5-20
Débit d'air asséchant	kg/s	0.14 à 0.30
Température de l'air asséchant	°C	30-50 °C
Humidité relative d'air	%	20-90%

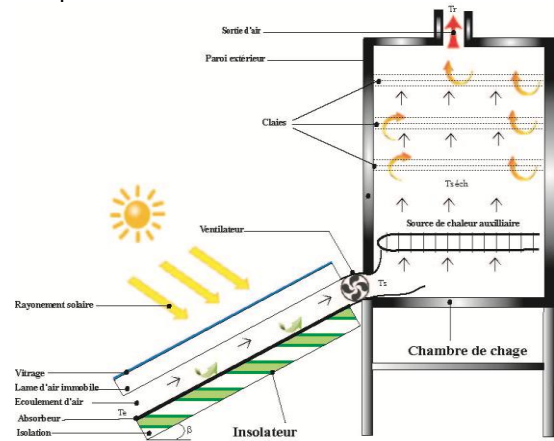


Figure 1: Représentation schématique d'un système de séchage modulaire.

2.2. Méthodes

Les équations qui régissent les transferts dans l'insolateur et l'armoire de séchage sont basées sur l'analogie entre les transferts de chaleur et les transferts électriques. L'insolateur et le séchoir sont découpés en tranches fictives perpendiculaires à la direction de l'écoulement d'air. Pour le séchoir, une tranche est définie par l'espace délimité par deux claies consécutives. Les équations de bilan thermique relatif aux différentes tranches du système sont écrites avec les hypothèses suivantes : (i) Les différents milieux solides sont à une température uniforme dans le plan perpendiculaire à l'écoulement de l'air, (ii) Il n'y a pas de rétrécissement ni de déformation du produit au cours du séchage, (iii) les propriétés thermo-physiques de l'air et du produit sont constantes dans la gamme de température considérée.

$$m_j C_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial t} = \sigma_{sj} + \sum_{k=1}^n (h_{r,j-k} + h_{c,j-k} + h_{d,j-k}) (T_k - T_j) \quad (1)$$

La vitesse de séchage des feuilles de menthe retenue dans nos calculs vérifie la relation suivante [9] :

$$\left(-\frac{dX^*}{dt} \right) = \left(-\frac{dX^*}{dt} \right)_0 (2,17683X^* - 8,02535X^{*2} + 20,94598X^{*3} - 25,6662X^{*4} + 11,68) \quad (2)$$

Avec :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}, \quad X_{eq} = 1,161 + 106,936H_r - 311,778H_r^2 + 264,997H_r^3, \quad \left(-\frac{dX^*}{dt} \right)_0 = \alpha v_p^\beta (T_a - T_h), \quad \alpha = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ et } \beta = 2,57 \quad (3)$$

La méthode d'optimisation que nous avons formulée est basée sur la recherche d'un optimum monétaire du coût de séchage, du bénéfice net réalisé pour une couverture solaire maximale [9]. Une telle démarche permet d'éviter un surdimensionnement sur le plan énergétique et financier. Pour le modèle économique, nous adoptons les hypothèses suivantes : (i) les taux sont supposés constants pendant la durée de vie du système, (ii) les coûts et les gains sont annuels, (iii) le coût initial est financé par emprunt. L'optimisation technico-économique repose sur le meilleur compromis entre ses performances thermiques et son coût d'installation et de son exploitation. Nous avons considéré une durée de 20 ans comme étant la durée de vie du système. Pour caractériser les performances thermique et économique de ce système de séchage, nous définissons :

$$\eta_D = \frac{m_v L_v}{Q_u + Q_{AUX}} \quad , \quad f = \frac{Q_U}{Q_U + Q_{AUX}} \quad (4)$$

$$\hat{B} = \hat{R}_g - \hat{C}_g \quad ; \quad t_R = \frac{\hat{C}_0}{\hat{R}_g - (\hat{C}_A + \hat{C}_F + \hat{C}_M)} \quad \text{Avec : } \hat{C}_g = \hat{C}_0 + \hat{C}_A + \hat{C}_F + \hat{C}_M \quad \text{et} \quad \hat{R}_g = \beta_s M_{ps} C_{u-ps} \quad (5)$$

3. Méthodologie numérique

Dans chacune des tranches de l'insolateur et du séchoir, les systèmes d'équations algébriques déduits d'une discrétisation de ces équations par une méthode implicite aux différences sont résolus par l'algorithme Diablo- Sablier [9] couplé à un calcul itératif puisque les coefficients du transfert; notamment ceux par rayonnement, sont fonction des températures des différents milieux qui sont à l'instant $t+\Delta t$ des inconnues. Ainsi pour mener à bien ces calculs, les coefficients de transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont calculés à l'instant $t+\Delta t$ en attribuant aux températures des différents milieux considérés une valeur arbitraire prise égale à la température ambiante. La résolution de ces systèmes d'équations algébriques conduit à de nouvelles valeurs de la température des milieux considérés. Ces valeurs sont comparées aux valeurs arbitraires; si l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs arbitraires est supérieure 0.05°C , les valeurs des températures calculées remplacent la valeur arbitraire et la procédure de calcul décrite ci-dessus est reprise jusqu'à ce que la précision souhaitée soit atteinte. La température de l'air dans la tranche considérée est ensuite calculée et est considérée comme égale à la température de l'air à l'entrée de la tranche suivante. L'évaluation économique est basée sur le calcul de la valeur de l'aire de l'insolateur ($\frac{\partial Cs}{\partial A_c} = 0$) pour laquelle le coût du système de séchage et de son fonctionnement sont optimaux. La durée d'amortissement est supposée atteinte lorsque la somme des gains financiers générés par le séchoir est égale au montant de l'investissement initial (Bénéfice actualisé= coût de l'investissement initial actualisé). Pour mener à bien ce calcul, nous avons développé un programme écrit en Fortran. Nous avons utilisé dans ce programme les principales relations reportées ci-dessus (5), les formules d'actualisation / capitalisation et les données économiques reportées dans le tableau 2.

4. Résultats et discussion

Les calculs ont été effectués en supposant que la durée d'une opération de séchage est, au maximum, égale à celle de la période ensoleillée. Les teneurs en eau initiale et finale de la menthe sont prises égales à 53 % (base humide) et 10% (base humide). Les données météorologiques et radiométriques basées sur la notion de journée type utilisées dans nos simulations sont celles d'Alger (Algérie). Nous avons analysé l'influence du débit de l'air asséchant (0.14 à 0.30 kg s^{-1}), de l'aire de l'insolateur (1 à 10 m^2) sur le rendement de l'insolateur et le taux de couverture solaire pour trois valeurs du taux de recyclage de l'air asséchant (25%, 50% et 75%) à travers le séchoir. Les valeurs retenues pour les paramètres caractéristiques du modèle économique sont reportées dans le tableau 2.

4.1 Rendement de Séchage

La figure 3 illustre le rendement de séchage pendant 12 jours caractéristiques de l'année pour différents débit massique d'air. La valeur maximale est obtenue pendant les jours d'été caractérisés par une température ambiante élevée et une humidité relative de l'air assez faible pour la région d'Alger. L'augmentation du débit massique d'air entraîne une augmentation du rendement du séchage puisque les coefficients de transfert de chaleur et de masse entre les feuilles de menthe et l'air asséchant sont fonction de la vitesse de l'air asséchant.

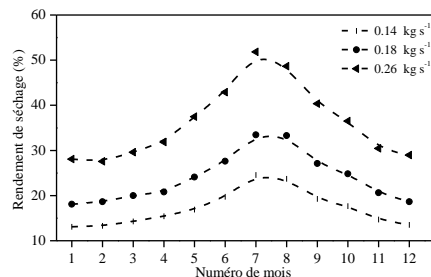


Figure 3 : Rendement d'évaporation en fonction de 12 journées types de l'année pour différents débits

4.2 Couverture solaire

La couverture solaire atteint, pour les trois débits d'air considérés dans nos calculs, une valeur maximale au mois d'août (fig. 4). Il est à noter qu'elle est d'autant plus élevée que le débit de l'air asséchant est faible. Ce résultat est corroboré par celui concernant l'influence du débit d'air sur le rendement de l'insolateur. Aussi, la connaissance de la valeur maximale du taux de couverture solaire peut contribuer à la détermination du débit d'air asséchant pour lequel le rendement de séchage est maximal. Le taux de couverture solaire maximal diminue avec l'augmentation du poids de feuilles de menthe (Fig. 5). En effet, la quantité de chaleur nécessaire au séchage est fonction de la quantité d'eau à éliminer du produit et par conséquent du poids du produit à sécher. L'analyse de cette figure montre que, pour une température de l'air asséchant de 30 °C, le taux de couverture solaire maximal correspond au plus faible poids de feuilles de menthe et à un taux de recyclage de l'air à travers le séchoir le plus élevé.

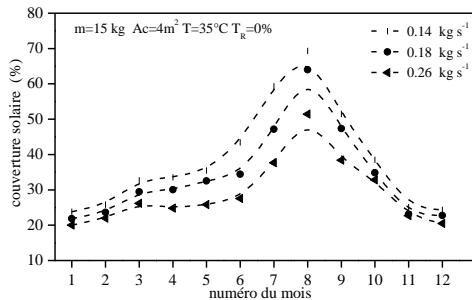


Figure 4 : Evolution du taux de couverture solaire au cours d'une année. Influence du débit massique d'air asséchant

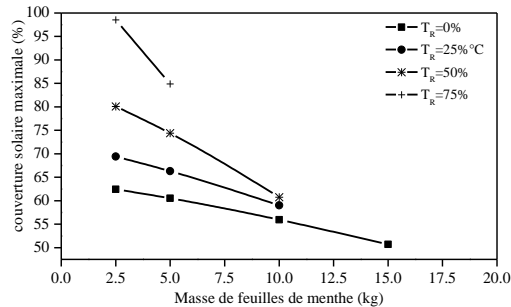


Figure 5 : Evolution de la couverture solaire maximale en fonction de la masse de feuilles de menthe

4.3 Période d'amortissement

Le temps de retour sur investissement est une fonction de la quantité d'énergie économisée, des coûts de l'énergie nécessaire à son fonctionnement et du montant de l'investissement. La durée d'amortissement (ou délai de récupération) augmente avec la surface de captation du flux solaire, donc du nombre d'insolateur (figure 6). Les valeurs des paramètres économiques reportées dans le tableau 1 montrent que les insolateurs représentent la plus grande part de l'investissement de ce système de séchage solaire. Il est à noter que la durée de cette période d'amortissement diminue avec l'augmentation du prix de vente de la menthe séchée. Ainsi, pour une aire de captation du flux solaire de 2 m² et les conditions optimales de fonctionnement (débit= 0.3 kg/s, Température= 35°C, fraction de l'air recyclé 50%) la période de fonctionnement est d'environ deux années. Le débit d'air asséchant et son taux de recyclage influence de façon significative le délai d'amortissement (Figure 7). Ainsi, une augmentation d'une part, du taux de recyclage et d'autre part, du débit d'air asséchant conduisent à une diminution du délai d'amortissement. Ces résultats sont corroborés par ceux obtenus lors de l'analyse de l'influence du taux de recyclage de l'air asséchant et du débit d'air sur la durée de séchage et le rendement du séchoir.

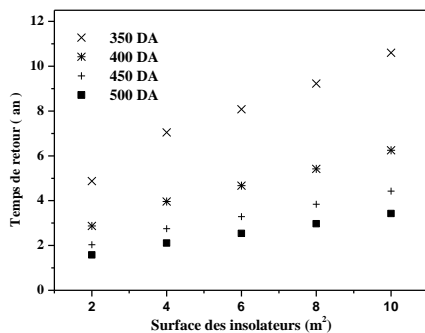


Figure 6 : Evolution du délai d'amortissement en fonction de l'aire des insolateurs. Influence du prix de vente d'un kg de menthe sèche

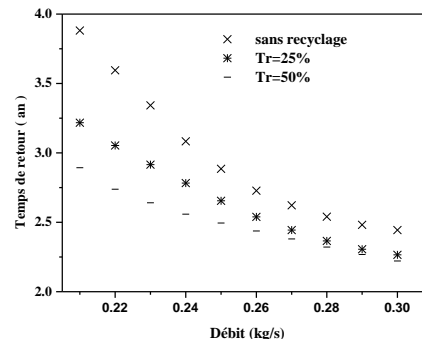


Figure 7 : Evolution du délai d'amortissement en fonction du débit d'air asséchant. Influence du taux de recyclage

4.4 Flux financier net

L'accroissement de l'aire des insolateurs conduit naturellement à une augmentation du coût de séchage mensuel puisque le coût de l'investissement est d'autant plus élevé que le nombre d'insolateurs est important. Sur la figure (8), nous avons reporté l'évolution du flux financier net en fonction de l'aire des insolateurs. Nous observons que pour les valeurs des taux de recyclage considérées, ce flux passe par une valeur minimale pour une aire d'insolateur égale à 4 m^2 . Il atteint pour valeur du taux de recyclage des valeurs maximales l'une correspond à une aire de 2 m^2 , l'autre à une aire de 8 m^2 pour un fonctionnement sans recyclage et à 7 m^2 pour un fonctionnement avec un taux de recyclage de 25% et 50%.

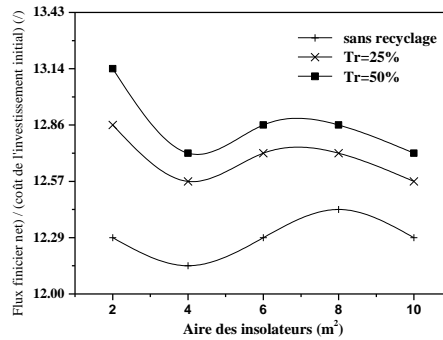


Figure 8 : Evolution du flux financier net en fonction de la surface des insolateurs. Influence du taux de recyclage

Conclusion

Nous avons procédé à la simulation du fonctionnement d'un système de séchage modulaire et à une analyse sommaire de sa faisabilité thermo-économique de ce système de séchage. Nous avons montré que :

-Le taux de couverture solaire et le rendement de l'insolateur sont respectivement égaux à 60% et 75% et le temps de retour est de 2 ans pour un prix de vente de la menthe séchée de 400 DA/kg. Durant la période d'été, où la température extérieure de l'air voisine de 30°C , la couverture solaire peut atteindre 80% et le coût de séchage peut être très compétitif pour des quantités importantes de produit.

-le flux financier net est d'autant plus important que le taux de recyclage est élevé et il existe une même valeur pour laquelle ce flux financier est minimal.

Nomenclature

Symbole	Nom, unité	
A_c	aire des insolateurs, m^2	v_p vitesse de l'air asséchant, m s^{-1}
\hat{B}	bénéfice net actualisé, DA	X^* teneur en eau réduite, $\text{kg d'eau kg}^{-1} MS$
C_0	investissement initial, DA	$X(t)$ teneur en eau à l'instant t, $\text{kg d'eau kg}^{-1} MS$
C_A, C_M, C_F	coûts d'assurance, maintenance et fonctionnel, DA	X_{cr} teneur en eau critique, $\text{kg d'eau kg}^{-1} MS$
\hat{C}_g	coût global actualisé, DA	X_{eq} teneur en eau d'équilibre, $\text{kg d'eau kg}^{-1} MS$
C_p	chaleur spécifique, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\left(-\frac{dX^*}{dt}\right)_0$ vitesse de séchage de la phase initiale, $\text{kg d'eau kg}^{-1} \text{g MS s}^{-1}$
f	taux de couverture solaire, (%)	
h	coefficient d'échange thermique, $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$	Symboles grecs
H_r	humidité relative de l'air, %	σ_s terme source, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
L_v	chaleur d'évaporation, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	η_D rendement de séchage, %
\dot{m}	débit d'air asséchant, kg s^{-1}	
m	la masse, kg	Exposant, Indices
\hat{R}_g	Recette globale actualisé, DA	r rayonnement
T	température, K	c convection
T_h	température humide de l'air asséchant, K	d conduction
T_p	température du produit, (K)	v vapeur d'eau
T_r	taux de recyclage, %	j, k indice des éléments
t_R	temps de retour de l'investissement, an	

Références

- [1] Document, Manuel du séchage Solaire au Maroc, GRET, 1995.
- [2] B.K.BALA, Drying and Storage of Cereal Grains, Category: Books, Publisher: Science Pub Inc, 1997.
- [3] AMAN DANG and N. K. BANSAL, Economic analysis of solar systems, Energy Convers. Mgmt, Volume 25(2), Pages 159-169, 1985.
- [4] A. SREEKUMAR, Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables, Energy Conversion and Management, Volume 51, Pages 2230–2238, 2010.
- [5] S. BOUGHALI, H. BENMOUSSA, B. BOUCHEKIMA, D. MENNOUCHE, H. BOUGUETTAIA, D. BECHKI, Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara, Solar Energy, Volume 83, Pages 2223–2232, 2009.
- [6] W. RADAJEWSKI, P. JOLLY, G. Y. ABAWI, Optimization of Solar Grain Drying in a Continuous Flow Dryer, J. agric. Engng Res, Volume 38, Pages 127-144, 1987
- [7] I.N. SIMATE, Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers, Renewable Energy, Volume 28, Pages 435–453, 2003.
- [8] TSHEWANG LHENDUP, Technical and financial feasibility of a solar dryer in Bhutan, Energy for Sustainable Development, Volume IX (4), Pages 17-24, 2005.
- [9] John A. Duffie William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Category: Books, 3rd Edition, 2006.

Annexe

Tableau 2 : données utilisées dans les calculs

Paramètres		Unité	valeur	Produit séché	ζ^{ps}	%	-5
Durée de vie	N	an	20	Produit frais	ζ^{pf}	%	5
Cycle de crédit Ne	Ne	an	5	Emprunt	ζ^e	%	0.03
Cycle de séchage	ts	h	8-12	Electricité	ζ^{el}	%	3
Rapport massique	β_s		0.127	Taux d'inflation	i	%	5.3
Prix produit frais	C_{u-pf}	DA/kg	20±10	Taux d'intérêt emprunt	i_e	%	16
Prix produit séché	C_{u-ps}	DA/kg	350-500	Taux d'actualisation	Ω	%	8
Travail de l'employé		DA/h	125	coût des composants du système de séchage solaire			
Main-d'œuvre		homme	1	Insolateur simples		DA	40.000
Taux d'utilisation		jours/an	240	pas			
Prix kWh		DA/kWh	3.65	conduits +régulation		DA	5000
Taux Maintenance	M_M	%	4	Ventilateur		DA	2.000
Taux Assurance	M_A	%	1	Chauffage auxiliaire		DA	3.000
Taux de variation annuels				Chambre de séchage		DA	20.000
Assurance	ζ^A	%	3	Coût total du capital		DA	70.000