

1ère partie  
Production  
de la vapeur

**2ème partie**  
**Utilisation**  
**de la vapeur**



3ème partie  
Production  
de glace

4ème partie  
Memento  
technologique

5ème partie  
vers d'autres  
horizons



Accédez à la  
documentation  
complète de  
[www.soleil-vapeur.org](http://www.soleil-vapeur.org)

**2ème Partie** Liste des chapitres:

Chap I – La plaque chauffante à vapeur

Chap II – Le caisson isolant

Chap III – La stérilisation médicale

Chap IV – La cuisson alimentaire à l'eau et à la vapeur

► **Chap V – Performances et autres concepts**

Chap VI – Autres cuissons agro-alimentaires

Chap VII – Agro-carburants, huiles essentielles....

Chap VIII – Autres modes d'utilisation de la vapeur

## **Chapitre V PERFORMANCES ET AUTRES CONCEPTS**

Pages

2	Section I LES PERFORMANCE DE L'INSTALLATION DU POINT DE VUE DE L'UTILISATEUR
2	§ 1 la méthode
3	§ 2 les conditions météorologiques
3	§ 3 l'effet cosinus horaire
4	§ 4 la mise en chauffe du bouilleur et les rechargements en eau fraîche
4	§ 5 d'autres types d'évaluation des performances
5	§ 6 contrôle des performances énergétiques
5	§ 7 l e capteur et son utilisateur
6	§ 8 et la performance économique ?
6	Section II QUELQUES RAPPELS DE THERMIQUE
6	puissance thermique, niveau de température, quantité d'énergie,
7	pertes thermiques, effet d'échelle, delta de température

## SECTION I LES PERFORMANCE DE L'INSTALLATION DU POINT DE VUE DE L'UTILISATEUR

La mesure des performances d'un capteur solaire est une affaire compliquée à souhait. Toute simplification confine rapidement à la malhonnêteté intellectuelle, et toutes les complications, bien réelles, permettent de noyer facilement le poisson dans l'eau.

Les performances du capteur sont évaluées selon deux points de vue

- du point de vue de la *production d'énergie*: quelle est la quantité d'énergie thermique produite par un capteur de 2m<sup>2</sup>, et quelle est sa température ? Ce premier point de vue a été abordé dans la première partie de la documentation, au chapitre 1-VI.

- du point de vue de *l'utilisateur final*: que puis-je faire avec un capteur de 2 m<sup>2</sup> ? (et que ne puis-je pas faire ?). Voici une réponse brève: on peut mesurer les performances d'un capteur solaire par la méthode du " temps de montée à l'ébullition du litre d'eau supplémentaire". Dans le cas du petit capteur de 2m<sup>2</sup>, par ciel clair et temps correct, le temps de montée est de 10 à 15 minutes.

### § 1 LA METHODE

Elle consiste à mettre à ébullition un récipient contenant deux à trois litres d'eau, puis à rajouter un litre d'eau et à mesurer le temps de montée à l'ébullition de l'ensemble.

Le petit problème qui se pose avec cette méthode est de définir parfaitement le point d'ébullition: s'agit-il d'une ébullition frémissante, forte ou violente ? Entre l'une et l'autre, le laps de temps peut être supérieur à 2 minutes, soit une erreur de mesure de plus de 20%

La solution est d'utiliser un thermomètre, et de s'en tenir à la montée en température à 97° C (ou 98, ou 99°), afin de faire des comparaisons avec d'autres mesures: il n'est que de l'indiquer, en affichant les performances. On peut utiliser un thermomètre comme celui proposé pour la chaudière (1ère Partie/ Etude du circuit de vapeur), et traverser le couvercle avec la sonde, par exemple à travers l'évent des couvercles en verre. Il n'est pas nécessaire que la sonde plonge dans le liquide, car grâce à l'isolation, la température ambiante à l'intérieur du récipient est sensiblement égale à la température du liquide en fond de récipient (d'où le bon fonctionnement de la cuisson à la vapeur à pression atmosphérique)

Rien n'interdit de faire de fines mesures énergétiques

Soit 1 litre d'eau à 26° que l'on introduit dans un récipient d'eau bouillante. Le retour à 99° C s'effectue en 12 minutes et 23 secondes

Quantité d'énergie: 1 000 grammes x 4,18 Joule X (99-26) = 305 140 Joule

Temps de remontée à ébullition: (12 mn x60 sec) + 23 sec = 743 secondes

Puissance = 305 140 Joule/743 sec = 410 Watt

Toute mise en comparaison avec d'autres chiffres pourrait être fallacieuse. Que représentent les 410 Watt ci dessus, au regard des 1200 W du brûleur d'une gazinière ? Mais les 410 Watt représentent le travail effectué, alors que les 1 200 Watt représentent ce que l'on paiera au fournisseur d'énergie, indépendamment de l'usage que l'on en fait et de toute la chaleur qui passera autour de la casserole. Ce sont des chiffres où chacun voit midi à sa porte, qui peuvent alimenter les discussions le soir à la veillée.

## § 2 LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Des explications sur le **rayonnement solaire** et sa mesure ont été fournies en 1ère partie, on n'y revient pas ici. Pour que le capteur fonctionne correctement, il lui faut un ciel clair et sans nuage ni atmosphère encombrée de particules ou d'humidité. Les ombres au sol sont alors franches et clairement délimitées. (le capteur fonctionne correctement à partir de 820 à 850 W de rayonnement solaire direct)

La **température ambiante** a peu d'importance sur le rayonnement reçu: un très beau ciel d'hiver convient parfaitement, un temps chaud et humide de mousson peut avoir un résultat médiocre. Toutefois, par temps froid, le niveau des pertes (qui est fonction de la différence de température entre l'environnement et la température de fonctionnement de l'installation) augmente. Soit une température de fonctionnement moyenne de l'installation de 110° C . Si la température ambiante est de 40°C, la différence est de 70° C. Si la température ambiante est de 0°C, la différence est de 110°C, et les pertes seront moitié plus importantes.

Le **vent** peut avoir une très grande importance: avec un vent glacial soufflant parallèlement au Concentrateur, la production de vapeur risque d'être très faible. C'est alors que l'on peut se poser la question d'une vitre en fermeture du Concentrateur Parabolique Composé.

La présence de **petits nuages bien délimités** dans un ciel clair n'a pas de grosse conséquence lorsque l'installation est en maintien de température (cuisson ou stérilisation), car l'effet "marmite norvégienne" joue à plein grâce à l'isolation du caisson. Ainsi, si la pression interne du stérilisateur est à 1,4 bar (juste en limite de la zone rouge du manomètre, avant que la soupape de sécurité du stérilisateur ne se déclenche), on peut sans problème cesser pendant 10 minutes l'alimentation en énergie thermique de la plaque à vapeur sans que le thermostat descende en dessous de la limite réglementaire de 1 bar

Si un petit nuage épais mais bien délimité apparaît pendant la montée en température, la montée en température cesse (après cependant un petit retard dû à l'inertie thermique et au "traînage" des mesures), mais la température interne de récipient ne descend pas.

## § 3 L'EFFET COSINUS HORAIRE

À l'heure de midi solaire, le capteur reçoit les rayons solaires "de face". À 9h00, il les reçoit "de biais", sous un angle de 45 °. Le rayonnement globalement reçu est donc moins important qu'à midi, selon un coefficient qui varie depuis 0,706 à 9h00 jusqu'à 1 à midi. Ce coefficient est en fait le cosinus de l'angle d'incidence du rayonnement à une heure donnée.

Par un beau temps bien établi, le rayonnement solaire mesuré perpendiculairement au flux est constant à 9h00, midi ou 15 h00, mais son incidence sur le miroir varie.

Capteur soleil-vapeur.org - Coefficient de réfraction du flux solaire en fonction de l'heure													
<b>Heure solaire</b>	9h 00	9h 30	10h 00	10h 30	11h 00	11h 30	12h 00	12h 30	13h 00	13h 30	14h 00	14h 30	15h 00
<b>Angle d'incidence du rayonnement sur le miroir, en °</b>	45 °	37.5 °	30 °	22.5 °	15 °	7.5 °	0°	7.5 °	15°	22.5 °	30°	37.5 °	45°
<b>Cosinus de l'angle = coefficient de réfraction du flux énergétique DNI</b>	0.71	0.79	0.87	0.92	0.97	0.99	1	0.99	0.97	0.92	0.87	0.79	0.71

Le temps de montée à l'ébullition du litre d'eau supplémentaire, s'il est de 10 minutes à midi, il est alors de  $10/0,8 = 12,5$  minutes à 10H00 ou à 14h00.

En annonçant des performances, il est préférable d'indiquer l'heure du relevé, en laissant l'interlocuteur libre d'interpréter les chiffres comme bon lui semble.

Enfin au cours de la journée, le niveau de température ambiante augmente et l'installation est globalement bien en chauffe, il n'y a donc pas symétrie parfaite entre les performances obtenues à 9h15 et celles obtenues à 14h 45

#### § 4 LA MISE EN CHAUFFE DU BOUILLEUR ET LES RECHARGEMENTS EN EAU FRAICHE

Le capteur est conçu pour fonctionner entre 9h00 et 15 h00 solaires. Avant 9h00 heures, une partie seulement de la chaudière et insolée par les rayons réfléchis provenant du grand miroir, mais cela n'empêche nullement de commencer à mettre le bouilleur en chauffe, et le bon conducteur doit avoir une machine à 100° C à 9h00 du matin, afin d'être opérationnel plus tôt possible.

Quant aux rechargements du bouilleur en eau fraîche à vaporiser, ils provoquent une baisse voire un arrêt temporaire (de l'ordre de la dizaine de minutes) de la production de vapeur. L'introduction d'eau fraîche est à effectuer pendant les périodes de cuisson proprement dite, là où la quantité d'énergie nécessaire est réduite à l'équivalent des pertes thermiques. La machine est ainsi immédiatement prête pour la mise en chauffe de la cuisson suivante

#### § 5 D'AUTRES TYPES D'EVALUATION DES PERFORMANCES

Tous les autres types d'évaluation sont laissés à l'appréciation de l'utilisateur...

Pour faciliter cette appréciation, on reprend ici la distinction entre la montée en température et la cuisson proprement dite.

##### **La montée en température**

L'eau est le corps le plus difficile à chauffer, il faut disposer de 4,18 Joule pour augmenter de 1° C la température de 1 gramme d'eau, c'est la définition de la *chaleur massique* de l'eau. (Peu importe ici la signification exacte du Joule). La chaleur massique des légumes, qui contiennent beaucoup d'eau, est assez proche : 3,85 Joule par gramme et par degré Celsius. Considérons, pour simplifier,

qu'elle est identique à celle de l'eau.

Le temps nécessaire pour mettre en chauffe 4 kg de légumes à cuire à la vapeur avec 0,5 litre d'eau est identique à celui nécessaire pour faire bouillir 4,5 litres d'eau, il est donc de l'ordre de 45 minutes.

On trouvera sur la Toile la chaleur massique des différents aliments, et l'on pourra ainsi évaluer des temps de montée en température en prenant pour étalon le litre d'eau bouillante.

### **La cuisson proprement dite**

À température identique le temps de cuisson est le même quelle que soit la source d'énergie : 20 minutes pour les pommes de terre, etc... (NB le temps de cuisson n'est pas ici comparable avec celui des fours solaires ou cuiseurs solaires à cuisson lente dont le niveau de température *dans la masse de l'aliment* n'est pas identique)

## **§ 6 CONTRÔLE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES**

Il existe une méthode simple de contrôle des performances de production énergétique du capteur, exposée en 1ère partie de la documentation, qui consiste à mesurer la quantité de condensats produits en un quart d'heure par le capteur, ou bien à mesurer le temps mis par le capteur pour produire 250 ou 330 grammes de condensats. Indépendamment de l'interprétation des résultats (qui n'est pas ici de notre propos immédiat), il est judicieux pour le conducteur de prendre note, de temps à autre, de ces chiffres ainsi que des conditions du moment : heure, ensoleillement. Les relevés sont à effectuer alors que la production de vapeur est en régime continu, hors remplissage d'eau fraîche à vaporiser, et hors manipulation intempestive du robinet de régulation manuelle des condensats.

En cas de dysfonctionnement global de l'installation, si l'on remarque une grande disparité dans les relevés, alors il est possible que la *production* d'énergie soit en cause. S'il n'y a aucune disparité notable, alors c'est peut-être *l'utilisation* de l'énergie qui est en cause.

Le chiffre de référence est une production de 250 grammes de condensats en un quart d'heure par beau temps bien établi entre 10h30 et 13h30 solaires..

Et si les robinets de régulation laissent échapper de la vapeur, n'y aurait-il pas un gravillon, ou un morceau de tissu éponge entre la plaque à vapeur et le récipient ?

## **§ 7 LE CAPTEUR ET SON UTILISATEUR**

On a souligné ici à plusieurs reprises le parallélisme entre le capteur et un bateau à voiles, on peut le rappeler à nouveau pour ce qui est de son utilisation : le capteur est à conduite manuelle. Un très bon voilier mené par un équipage incompetent ira s'échouer au fond du port dès que les amarres sont larguées. Pour le capteur aussi, il faut le mener intelligemment en fonction des circonstances, de la période de la journée. On est loin du "quand je veux et comme je veux", du "plug and play" auxquels nous a habitués la civilisation technologique.

Les performances effectives de la machine dépendent, pour une large part, de l'intelligence avec laquelle elle est menée.

Le temps permettant, le capteur travaille *en continu* tout au long de la journée, les cuissons doivent s'enchaîner sans interruption. Dans le cas des stérilisations médicales, trois séances quotidiennes sont un maximum. En matière de cuisson, trois à quatre séances quotidiennes sont un bon chiffre.

C'est à l'équipe de cuisson d'ajuster son travail en fonction des possibilités de l'installation. Effectuer une cuisson longue à l'heure de midi, alors que le capteur produit plus d'énergie qu'il n'en est besoin, est n'est pas très performant.

## § 8 ET LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE ?

Dans le cas du petit capteur de 2 m<sup>2</sup> il ne faut certainement pas s'attendre à une quelconque performance économique au regard des autres sources d'énergie.

Dans la première partie de la documentation était évoquée la notion de taille critique minimale pour une installation thermique : le rendement diminue avec la dimension de l'installation (effet d'échelle), et à partir d'un certain seuil, il ne faut même plus espérer produire de la vapeur. Il en va de même sur un plan économique : en dessous d'un certain seuil, le capteur ne présente aucun intérêt économique.

Le petit capteur de 2 m<sup>2</sup> a probablement la taille minimale possible pour un capteur utilisant de la vapeur. Son intérêt est double : effectuer des stérilisations médicales (où les conditions économiques sont différentes de la cuisson alimentaire), et servir d'outil pédagogique pour des installations plus importantes. Mais un capteur de 2 m<sup>2</sup> est bien en deçà d'un seuil économique

La puissance du capteur est fonction de sa surface, avec en plus un effet d'échelle. Le prix rapporté au m<sup>2</sup> diminue en fonction de la surface. On sait construire des capteurs de 8, 16 ou 20m<sup>2</sup>, d'une puissance de 4, 8 ou 10 kW disponibles pour l'utilisateur. Et rien n'interdit de juxtaposer plusieurs installations.

Où se trouve le seuil de rentabilité ?

## SECTION II QUELQUES RAPPELS DE THERMIQUE

Après avoir effectué quelques séances de cuisson et de stérilisation sur une plaque à vapeur, il n'est pas inutile de revisiter à nouveau quelques unes des notions de thermique qui régissent l'installation.

La **puissance thermique** de l'installation est fonction de la surface des miroirs de capteur. Le flux énergétique solaire est un flux dilué, qui ne dépasse guère 1000 Watt/m<sup>2</sup>. Pour disposer d'une grande puissance, il faut disposer d'une grande surface de capteurs.

Le **niveau de température** de l'installation dépend du degré de concentration. Le flux solaire étant un flux dilué (bis repetita) son niveau de température n'excède pas quelques dizaines de degrés, ce qui est insuffisant pour notre usage. Une solution consiste donc à concentrer le rayonnement, le niveau de température obtenu étant fonction du degré de concentration.

La **quantité d'énergie** et le **niveau de température** sont deux notions distinctes et non interchangeables. En disposant de 1 mètre cube d'eau à 80° C fournie par des capteurs plans, on dispose d'une grande quantité d'énergie, mais il est très difficile de cuire quelques kg de pâtes alimentaires. En disposant d'une flamme de bougie de quelques centaines de degrés, il est très difficile de faire bouillir un demi-litre de lait. Il faut donc convertir l'énergie solaire en quantité suffisante *et* avec le niveau de température nécessaire pour l'usage que l'on veut en faire.

Les **pertes thermiques** sont la plaie des installations solaires. Le principal problème des capteurs solaires n'est pas tant de collecter l'énergie, que d'éviter de la gaspiller une fois qu'elle a été collectée. Une très bonne isolation au stade de la collecte et du transfert d'énergie est évidente, mais

une isolation au stade de l'utilisation est tout autant indispensable, car les rendements de chaque composant sont multiplicatifs :  $X\% \times Y\% \times Z\% \dots$  (et... les pertes aussi!).

Les pertes thermiques étant par ailleurs fonction du niveau de température (plus exactement : fonction de la différence entre sa température de fonctionnement et la température ambiante), on a toujours intérêt à fonctionner avec le niveau de température minimum requis pour l'utilisation en cours.

### **Pertes thermiques et effet d'échelle**

Dans toute machine thermique, les pertes sont aussi proportionnelles aux surfaces de l'installation. Toute surface, isolée ou non, est source de pertes plus ou moins importantes.

Or pour toute installation, thermique ou autre, le rapport entre son volume et ses surfaces varie en fonction de la taille de l'installation. Par exemple : à conditions égales par ailleurs, un nourrisson se refroidit beaucoup plus vite qu'un adulte. Ou bien : on peut faire une rapide approche numérique en considérant le rapport volume/surface de cubes de différentes tailles.

Le volume est synonyme de puissance, les surfaces sont synonymes de pertes. Plus une installation thermique est petite, plus ses pertes sont proportionnellement importantes, et il existe un seuil minimum en dessous duquel l'installation n'est plus capable techniquement de rendre les services attendus.

L'effet d'échelle est redoutable. Il est probablement la cause de l'échec de travaux en milieu universitaire qui portent sur des maquettes ou des modèles réduits. Et c'est la raison pour laquelle il faut s'interdire de fabriquer une installation solaire à vapeur d'une surface inférieure à 2 m<sup>2</sup>, ce ne serait qu'une contre-performance pour prouver que "ça ne marche pas".

La **différence de température  $\Delta T$**  entre le flux énergétique de vapeur et le contenu à l'intérieur du récipient de stérilisation ou de cuisson est de l'ordre de 20 à 30° C. Ce fut la divine surprise des premiers essais. Un si faible  $\Delta T$  est dû à de multiples facteurs : l'utilisation de la vapeur (dont le coefficient de transfert thermique est de loin le meilleur qui soit, voir le memento à ce sujet), l'utilisation de l'aluminium pour la plaque à vapeur, la cuillerée d'huile répandue sur la plaque pour un bon transfert thermique entre la plaque et le récipient, et enfin l'isolation du récipient de cuisson. Noter que pour les très grandes marmites à double fond de cuisine collective, un  $\Delta T$  de 10° est suffisant pour faire bouillir de l'eau.

Pour la stérilisation, la température requise est de 121° C à l'intérieur du récipient, soit une température de 140 à 150° C / 2,6 à 4 bar pour le circuit de vapeur (rappel : il existe une relation immuable entre la température et la pression de la vapeur). On est donc en dessous du seuil de Température Maximale de Service de l'installation qui est de 164° C /6bar

Pour les cuissons à l'eau ou à la vapeur à pression atmosphérique, le niveau de température à l'intérieur du récipient ne dépasse jamais 100° C. Au delà, l'eau du récipient de cuisson se transforme en vapeur et s'échappe hors du récipient, d'autant plus vite que l'apport d'énergie est important. Une fois le contenu du récipient porté à la température de 100°C, il suffit donc d'apporter un peu d'énergie pour compenser les pertes thermiques, lesquelles sont minimales grâce au caisson isolant.

Dans le cas d'un braisage de légumes ou de cuisson d'une viande en sauce, la température ne dépasse pas non plus 100° C, sans quoi l'eau s'évaporerait, et "ça attacherait" au fond du récipient. Au besoin, il est facile de faire la vérification à l'aide du thermomètre identique à celui utilisé sur le bouilleur du capteur.