

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



**1ère Partie** Liste des chapitres:

Chap I – Dossier de calculs

► **Chap II – Conception du capteur**

Chap III – Etude du capteur

Chap IV – Etude du circuit de production de vapeur

Chap V – Construction du capteur et du circuit de vapeur

Chap VI – Installation, Conduite, Performances, Maintenance

Chap VII – La malle pédagogique

Chap VIII – Plans informatiques.

Chap IX – Ombre portée d'un baton

Chap X – les positions du capteur



Accédez à la  
documentation  
complète de

[www.soleil-vapeur.org](http://www.soleil-vapeur.org)

## Chapitre II CONCEPTION du CAPTEUR

Pages

2	Section I -REFLEXIONS PREALABLES A LA CONCEPTION D'UN CAPTEUR
3	§ 1) les paramètres du premier étage
	A) Surface du miroir
	B) Elancements Est/Ouest, et surface utile
4	C) La largeur du miroir
	D) La longueur du miroir
	E) La longueur focale du miroir
5	F) La poutre tubulaire
	§ 2) les paramètres du second étage
	A) Le Concentrateur Parabolique Composé
	1-Le CPC, pièce maîtresse du capteur
	2-L'angle d'acceptance
	3-Pupille de sortie et taux de concentration
6	4-Pupille de sortie et Angle de dépointage
	5-le choix final
	B) Le Bouilleur
7	§ 3) le paramètre relatif au couplage du premier et du second étage
8	Section II -LES CALCULS DE CONCEPTION D'UN CAPTEUR
	§ 1) introduction des paramètres
10	§ 2) valeurs calculées
12	§ 3) après la phase de conception
13	§ 4) capteur solaire et architecture navale
14	Section III QUELQUES CONFIGURATIONS DE CAPTEUR
14	§ 1) Miroir de 2.50 m

16	§ 2) Miroir de 2.00 m
18	§ 3) Miroir de 1.25 m
20	Section IV LE SOLEIL, LA TERRE ET LE CAPTEUR
20	§ 1) Le soleil et la terre
24	§ 2) Le soleil et le capteur
26	§ 3) La terre et le capteur
28	§ 4) Le capteur, la Terre et le Soleil vus du Celescope
29	§ 5) Mesure du flux solaire, et effet cosinus horaire
31	§ 6) L'équation des temps
32	Section V AU SUJET DU CPC
32	§ 1) Préliminaires: la parabole
33	§ 2) Présentation générale du CPC et sources documentaires
33	§ 3) Construction, calculs et dessin
35	§ 4) Le CPC et le capteur

## **SECTION I RELEXIONS PREALABLES à LA CONCEPTION D'UN CAPTEUR**

Pour définir un capteur, il faut effectuer un certain nombre de choix, et optimiser certains paramètres.

**LES CHOIX:** Le capteur est du type linéaire horizontal orienté Est-Ouest, à deux étages. Le premier étage comprend un miroir principal du type cylindro parabolique. Le second étage comprend un Concentrateur Parabolique Composé, et un bouilleur. Les deux étages sont reliés par une structure du type "poutre tubulaire triangulaire". Le capteur produit, pendant six heures par jour, de la vapeur saturée humide entre 100 et 164° C, soit 0 à 6 bars manométriques. La chaudière est alimentée en eau fraîche à vaporiser par une petite pompe manuelle, l'autonomie de la chaudière est de l'ordre de une heure et demie

**Poursuite du Soleil:** il s'agit d'un capteur à conduite manuelle, mais avec possibilité d'automatisation et de motorisation. Le suivi quotidien, pendant l'amplitude de six heures, s'effectue par rotation de la structure sur son arête Sud (pour un capteur placé à l'hémisphère Nord).

Tous ces choix sont discutables; toutefois, dans le cadre de la présente "procédure de définition d'un capteur", ils sont pour le moment considérés comme établis.

**LES PARAMETRES** sont fortement imbriqués ou hiérarchisés. On ne retient ici que les plus importants, afin de décrire leurs grandes articulations, et de circonscrire, par approches successives, les plages de valeurs optimum à retenir.

On distingue deux grands groupes de paramètres:

- les paramètres relatifs au premier étage,
- les paramètres relatifs au second étage

et un paramètre relatif au couplage des deux étages:

- l'angle mort, afin d'éviter l'effet d'ombre du second étage sur le premier.

## § 1 - LES PARAMETRES DU PREMIER ETAGE: LE MIROIR PRINCIPAL

### A)-SURFACE DE MIROIR

Le profil du miroir Cylindro parabolique du premier étage, dans le sens Nord-Sud, est une fraction d'arc de parabole (quelque peu éloignée du sommet). Dans le sens Est-Ouest, on donne au miroir la longueur voulue en fonction de la puissance désirée.

Puissance du capteur: c'est la puissance nette sous forme de vapeur, disponible pour l'utilisateur

Rendement du capteur: c'est le rapport "puissance disponible/flux solaire".

#### 1) l'effet d'échelle

*Effet d'échelle et rendement:*

Pour un ensoleillement donné, la puissance du capteur est principalement fonction de la surface utile du miroir; mais dans les petites tailles, il faut tenir compte d'une diminution de rendement due à un effet d'échelle pénalisant, que l'on remarque notamment dans le petit capteur de 2m<sup>2</sup>. En bas de l'échelle, il existe une taille critique minimum (phénomène usuel en matière de thermique): ainsi, la maquette avec ses quelques dm<sup>2</sup> de miroir, n'a aucune puissance thermique

*Effet d'échelle et niveau de température*

L'effet d'échelle est également sensible sur le niveau de température obtenu. (alors que dans un premier temps, on aurait tendance à ne considérer que le couple concentration-température). Ainsi, le niveau de température de la maquette est insignifiant.

Le problème majeur des capteurs solaires n'est pas de récupérer de l'énergie solaire, mais surtout d'éviter de la perdre

#### 2) le rapport largeur/longueur du miroir

Dès la conception du capteur, il faut tenir compte de ratios tels que le rapport entre la totalité des surfaces chaudes (c'est à dire la totalité des surfaces qui *perdent* de la chaleur, qu'elles soient isolées ou non isolées), et la surface de miroir *fournissant* de la chaleur.

Or le rapport entre la largeur et la longueur du miroir, influe directement sur le rapport précédent: un capteur au miroir long et étroit aura autant de pertes que de production

### B)-ELANCEMENTS EST/OUEST, et SURFACE UTILE:

s'agissant d'un capteur linéaire horizontal orienté Est-Ouest que l'on désire faire fonctionner de 9h à 15h solaires, et dont le Concentrateur est fixe, il faut prolonger les extrémités du miroir principal par des élancements d'une longueur sensiblement égale à la focale, qui ne sont actifs que tour à tour, soit le matin, soit l'après midi; d'où la notion de surface utile du miroir.

Surface utile du miroir = largeur du miroir X longueur du bouilleur.

Surface inactive du miroir = largeur du miroir X focale X 2.

L'effet d'extrémité des élancements est indépendant de la longueur du capteur, mais il est d'autant plus pénalisant (en termes de coûts de construction) que la longueur du capteur, dans le sens Est-Ouest, est petite

En première approche, afin de minimiser le rapport surface inactive/surface active, on aurait tendance à allonger le capteur et diminuer la focale. Mais les désavantages d'un capteur long et étroit (pertes thermiques) sont bien plus importants que les économies de matière d'un capteur plus ramassé, et mèneraient tout droit à la contre-performance.

Pour le moment, à surface active de miroir égale, on préférera un capteur court à un capteur long, malgré l'apparent surcoût du miroir principal.

### C)-LA LARGEUR DU MIROIR, dans le sens Nord-Sud

Outre les considérations thermiques ci dessus, , la largeur du miroir influe directement sur l'ergonomie du capteur. Il est préférable, dans le cas d'un capteur à usage alimentaire, de rester "à hauteur d'homme"

En définitive, compte tenu de l'expérience des capteurs précédents, (et compte tenu aussi des dimensions commerciales des tôles...) la largeur développée du miroir d'un capteur de 2 m<sup>2</sup> est fixée à 1.25 m. S'agissant d'un arc de parabole, la surface de captation du flux solaire sera légèrement moindre

Pour de plus grandes puissances, et s'il n'y a pas d'impératif majeur du point de vue ergonomique, une largeur de 2.00 m ou 2.50 m est bien plus avantageuse, et permet d'atteindre des températures plus élevées.

### D)-LA LONGUEUR DU MIROIR.

Compte tenu de la puissance souhaitée pour le capteur à usage de cuisson et de stérilisation, et compte tenu également de l'expérience des capteurs précédents, une surface de 2m<sup>2</sup> pour le miroir principal paraît suffisante; on lui donnera donc une longueur de l'ordre de 1.60 à 1.80 m *utiles*, plus les élancements Est et Ouest .

Si l'on souhaite un capteur plus puissant, il n'est que d'augmenter cette longueur, dont la limite maximum sera fixée par les contraintes mécaniques de la poutre tubulaire du capteur. Les élancements Est et Ouest restent identiques.

### E)- LA FOCALÉ DU MIROIR

- Initialement la focale du premier étage était sensiblement égale à la largeur du miroir: capteur « carré» (par analogie avec la configuration des moteurs thermiques). Cette disposition convenait.

- Allongement de la focale: le domaine a été exploré, il n'y a aucun avantage; le surcoût de poutre tubulaire devient vite important, et la plage angulaire de fonctionnement diminue (Cf études sur programme de René Raud)

- Ecrasement de la focale: en première approche, l'écrasement de la focale comporterait des avantages, surtout du point de vue de la structure tubulaire, et du point de vue ergonomique pour l'utilisateur. Mais le coefficient de réflectivité d'un miroir est fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires sur le miroir, et plus la focale est courte, plus cet angle d'incidence devient rapidement défavorable dans la fraction de parabole éloignée du sommet.

conclusion: on adopte une configuration de capteurs « super carrés » mais sans exagération (par exemple: focale = 80 à 90% de la largeur du miroir), afin de gagner en encombrement général.

F)- LA POUTRE TUBULAIRE comporte une ou plusieurs travées dont la longueur est égale ou quelque peu supérieure à la largeur du miroir. Il convient d'organiser la ou les travées de façon à disposer de deux ou trois points de rotation sur l'arête Sud, et de façon à disposer d'un point central de levage sur l'arête Nord, plus éventuellement deux points de blocage.

## § 2) LES PARAMETRES DU SECOND ETAGE

### A)- LE CONCENTRATEUR PARABOLIQUE COMPOSE

#### 1) Le CPC, pièce maîtresse du capteur

Le Concentrateur Parabolique Composé de R. Winston est une construction géométrique rigoureuse, caractérisée

- par une pupille de sortie, une pupille d'entrée, et une hauteur
- et par un angle d'acceptance, qui lie entre eux les trois éléments ci dessus.

La section V du présent chapitre fournit une brève description du CPC, ainsi que des références bibliographiques.

Dans le domaine de l'énergie solaire, le CPC est usuellement utilisé en l'orientant directement vers le soleil, "vers le haut". Dans le capteur Soleil-Vapeur, le CPC est orienté "vers le bas", couplé avec un miroir parabolique. C'est ce couplage, original, qui a fait l'objet d'un brevet. Précisons toutefois que dans le capteur « soleil-vapeur » *le CPC est utilisé non pour son pouvoir de concentration, mais pour sa capacité à rediriger vers une cible donnée un rayonnement provenant sous des angles d'incidence différents.*

#### 2) L'angle d'acceptance

C'est le *seul élément commun* entre le premier et le second étage. Les caractéristiques du miroir (largeur, focale...) déterminent l'angle d'acceptance du CPC.

Mais, pour un angle d'acceptance donné, on peut dessiner une multitude de seconds étages, par exemple en faisant varier la pupille de sortie, ce qui fera varier, de façon homothétique, la pupille d'entrée et la hauteur

#### 3) pupille de sortie et taux de concentration du capteur

C'est la pupille de sortie qui nous intéresse au premier chef .

Quand on détermine la largeur de la pupille de sortie pour une largeur de miroir donnée, on détermine également le taux de concentration du capteur, que l'on définit ici comme le rapport entre la largeur de miroir offerte au soleil, et la largeur de la pupille de sortie.

( c'est une définition quelque peu arbitraire du taux de concentration, il en existe plusieurs; d'autre part, il ne faut pas confondre le taux de concentration du capteur avec le taux de concentration du CPC, ce dernier n'étant jamais pris en compte)

Le niveau de température potentiel du capteur dépend directement du taux de concentration, sous réserve que la largeur du premier étage soit supérieure à la taille critique correspondant au niveau de température souhaité.

On constate qu'un taux de concentration de l'ordre de 30 est plus que suffisant pour produire de la vapeur dans les plages de température qui nous intéressent ici, à savoir entre 100 et 164°C / 0 à 6 bar

#### 4) Pupille de sortie et Angle de dépointage admissible

L'Angle de dépointage admissible est l'angle maximum sous lequel le capteur continue de fonctionner, de part et d'autre de sa position de pointage parfait, pour une hauteur donnée du soleil dans le ciel. Plus l'angle de dépointage admissible est important, plus le capteur est facile à conduire manuellement.

Quand on détermine la largeur de la pupille de sortie, on détermine ipso facto l'angle de dépointage

On constate que, avec un débattement angulaire de l'ordre de  $1^\circ$ , un capteur est parfaitement maniable manuellement

#### 5) le choix final

Il n'existe pas de second étage idéal: la définition du second étage dépend du taux de concentration souhaité (quel niveau de température ?), et de l'angle de dépointage admis (combien de repointages manuels du capteur en une journée de 6 heures?). Et, bien entendu, niveau de température et débattement angulaire sont des fonctions inverses l'une de l'autre. Tout est donc ici, une fois de plus, affaire de compromis

En pratique, et par prudence, une fois fixé le premier étage, on définit un second étage "d'encombrement maximum": dans le capteur ainsi défini, afin de fixer les dimensions de la poutre tubulaire reliant le premier et le second étage. On pourra toujours installer différents seconds étages afin d'approcher, expérimentalement, la meilleure configuration.

La largeur de la pupille de sortie, qui conditionne le taux de concentration du capteur et son débattement angulaire, est le paramètre dont le maniement demande le plus de subtilité

Pour le capteur de  $2\text{m}^2$ , une pupille de 40 mm permet un taux de concentration de 30 et un angle de dépointage de  $1.32^\circ$

### B)- LE BOUILLEUR

Le bouilleur (autrement dit: la chaudière) est un simple tube installé sur la pupille de sortie. Son diamètre est indépendant de la géométrie du CPC. Un même second étage peut donc être équipé de bouilleurs de différents diamètres, sous réserve que le diamètre du bouilleur soit au moins légèrement supérieur à la largeur de la pupille de sortie.

#### 1)- Bouilleur à remplissage unique:

sur une base de 0.650 Kg d'eau vaporisée par  $\text{m}^2$  de miroir et par heure, pendant 6 heures, on peut calculer le diamètre d'un bouilleur que l'on remplirait une seule fois par jour. (A titre indicatif: diam 114 pour un miroir de 2.00 m, et diam 139 pour un miroir de 2.50)

Un bouilleur à remplissage quotidien unique est confortable du point de vue de la conduite du capteur, mais il est pénalisant sur un plan thermique car il augmente beaucoup les surfaces chaudes qui *perdent* de la chaleur.

2) -Un bouilleur de diamètre inférieur a moins d'inertie et moins de pertes; mais il doit être alimenté (manuellement) à plusieurs reprises au cours de la journée à l'aide d'une petite pompe . Si le

capteur est utilisé en continu, cette alimentation intermittente fait baisser temporairement la température/pression de la vapeur produite.

Dans le cas du capteur de 2 m<sup>2</sup>, une chaudière de diamètre extérieur 48 mm a une autonomie de 1 heure et demie, suffisante pour assurer une séance de cuisson ou de stérilisation. Le chargement de la chaudière s'effectuant entre les séances de cuisson ou de stérilisation, la production de vapeur n'est pas pénalisée de façon significative.

### **§3) PARAMETRE RELATIF AU COUPLAGE DU PREMIER ET DU SECOND ETAGE: L'ANGLE MORT.**

Le miroir cylindro-parabolique est une portion de demi parabole quelque peu décalée par rapport à son sommet afin d'éviter l'effet d'ombre du CPC sur le miroir. L'angle formé par le sommet de la parabole/le point focal/et la rive du miroir voisine du sommet est un angle mort, dont la valeur dépend de l'encombrement du second étage. L'encombrement du second étage dépend

- de la taille du CPC proprement dit: pupille de sortie, pupille d'entrée, et hauteur (éventuellement après troncature)
- du diamètre de la chaudière
- de l'épaisseur de l'isolation
- du capotage

Une faible augmentation de la valeur de l'angle mort ne semble pas avoir de conséquence majeure dans la conception du capteur, hormis le fait que, si l'on déplace le miroir principal loin du sommet de la parabole, l'angle d'incidence des rayons sur le miroir devient, dans sa partie Sud, de moins en moins favorable. On s'efforcera donc de réduire l'angle mort au strict minimum tout en évitant l'effet d'ombre du concentrateur sur le miroir principal.

Deux remarques:

- le programme de calcul ci dessous prévoit d'introduire une valeur pour l'angle mort, mais les problèmes d'encombrement du second étage ne sont pas modélisés: l'éventuel effet d'ombre n'est connu qu'après avoir effectué les études de conception spécifique, qui tiennent compte du diamètre du bouilleur, de l'épaisseur de l'isolant, etc..; il faut donc procéder par approches successives
- le diamètre de la chaudière et l'épaisseur de l'isolation ne sont pas proportionnels à la largeur du miroir: la belle homothétie qui jusqu'à maintenant régissait les rapports entre miroir et CPC, s'effondre. Il faut refaire l'étude pour chaque cas de figure, d'où l'intérêt d'un programme de calcul.

## SECTION II - LES CALCULS DE CONCEPTION D'UN CAPTEUR

Les calculs de conception générale d'un capteur ont été regroupés dans un programme dont la description et l'utilisation font l'objet d'un document séparé. On n'en fournit ici que les grandes lignes.

L'introduction des données et l'affichage des résultats se font sur un seul écran.

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Caractéristiques du miroir et du CPC**

Focale du miroir:

Angle entre rive Nord et plan focal:

Diamètre du soleil:   
(0,533 = 32 minutes d'arc par défaut)

Largeur de la pupille de sortie du CPC:

Largeur développée du miroir:

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre:

Angle ombre:

**Valeurs Calculées**

Abscisse rive Nord:

Abscisse rive Sud:

Largeur apparente:

(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud:

Angle plan bissecteur:

Angle optimum:

Angle au sommet:

Angle dépointage:

Angle acceptance CPC:

Pupille d'entrée CPC:

Hauteur du CPC:

Largeur tache à 9.00h:

Concentration géom.:

**Visualisation**

Dépointage:

9h-15h

Toutes les données s'inscrivent dans un système d'axes orthonormés  $xOy$

$Ox$  est le plan focal,  $O$  est le sommet de la parabole sur laquelle s'inscrit le miroir,  $F$  est le foyer. Par convention, sur les croquis, on incline l'ensemble vers la gauche. Quand le capteur est en fonctionnement, la focale est bien sûr dirigée vers le soleil.

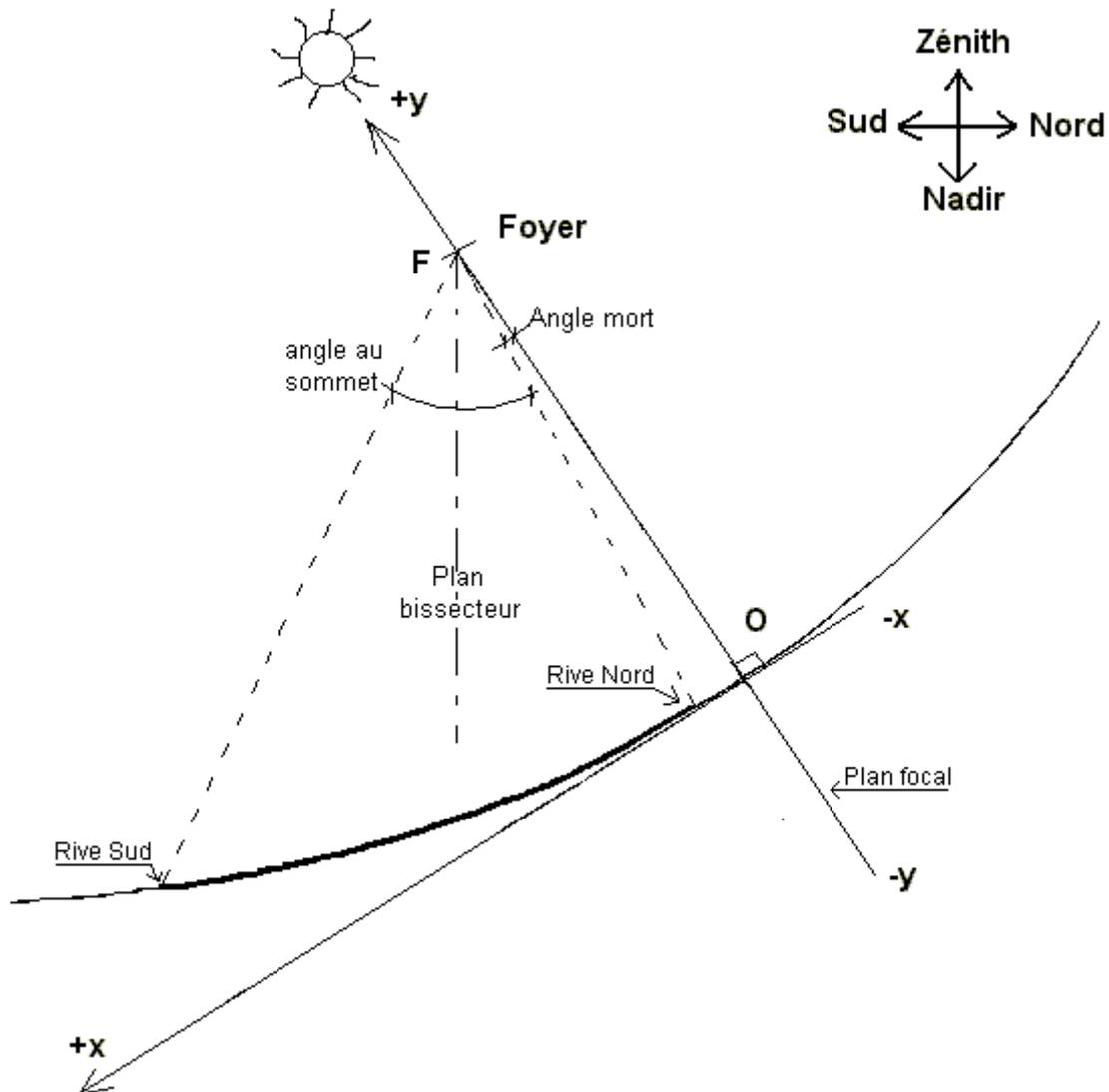
Par convention également, les valeurs positives de  $X$  sont à gauche du point  $O$ .

En pratique, ce schéma représente une coupe du capteur pour un observateur placé en bout du capteur, tournant le dos à l'Est, et regardant vers l'Ouest (du moins pour l'hémisphère Nord)

### § 1) INTRODUCTION DES PARAMETRES

On introduit les données dans le cadre supérieur gauche.

1) Focale du miroir C'est la distance  $OF$ , exprimée en mètres.



2) Angle entre rive Nord et Plan focal: « angle mort » le Concentrateur Parabolique Composé (CPC) est installé sur le plan focal. Afin que le CPC ne fasse pas d'ombre sur le miroir, ce dernier est légèrement décalé par rapport au sommet O de la parabole. L'ordre d'idée est de 4 à 8°  
 Attention: l'ombre du CPC dépend des dimensions du CPC, mais aussi de l'épaisseur de son isolation et de la forme donnée au capot en tôle qui l'entoure. Il conviendra donc de vérifier, dès les premiers dessins du capteur, que la valeur introduite ici est convenable, sinon il faut reprendre tous les calculs.

3) Diamètre apparent du soleil:

c'est une valeur constante... il n'y a donc pas lieu de la modifier! (sauf à titre de curiosité). Noter ici que c'est la *demi-valeur* de l'angle apparent du soleil qui est prise en compte.

4) Largeur de la pupille de sortie du CPC.

5) Largeur développée du miroir: c'est la largeur développée de la tôle du miroir, en mètres, mesurée entre la Rive Nord et la Rive Sud. Il faut tenir compte des dimensions commerciales des tôles disponibles (le degré de réflectivité est meilleur dans le sens du laminage)

## § 2) VALEURS CALCULEES

1) Abcisse rive Nord: c'est la valeur en x du bord de la tôle du miroir; cette valeur dépend de "l'angle entre Rive Nord et le plan focal" introduit précédemment, pour éviter l'effet d'ombre du CPC.

La valeur en y de la rive Nord est calculée par la formule de la parabole  $y = x^2/4f$ .

2) Abcisse rive Sud: idem

3) Largeur apparente: c'est la distance droite entre Rive Nord et Rive Sud, mesurée perpendiculairement à l'axe focal. C'est cette distance droite qu'il convient de prendre en compte pour calculer la surface de miroir effectivement présentée au soleil (outre l'effet cosinus horaire, dont il sera question plus loin). Cette distance droite est plus courte que la corde (qui, elle relie directement la Rive Sud et la Rive Nord), qui elle-même est bien, sûr plus courte que la «largeur développée du miroir »

Notons ici que le rapport Largeur apparente/Largeur développée devient rapidement défavorable lorsque la focale diminue: c'est une raison pour ne pas écraser exagérément la focale

4) Angle Rive Sud: c'est l'angle entre le plan focal d'une part, et une droite passant par le point F et la rive Sud (c'est l'équivalent de l'angle rive Nord introduit précédemment)

5) Angle plan bissecteur: Le plan bissecteur est situé sur la bissectrice entre l'angle rive Nord et l'angle rive Sud. *C'est sur ce plan bissecteur que sera installé l'axe de symétrie du CPC*

5 bis Angle optimum: ne pas tenir compte de cette valeur. En fait, des calculs optiques très pointus montrent que le choix ci dessus (installer l'axe de symétrie du CPC perpendiculairement au plan bissecteur) n'est pas la solution optimum. Toutefois, l'avantage ne serait pas majeur, et surtout il entraînerait des très grandes complications pour la réalisation du CPC ( qui ne serait plus symétrique!...). La notion d'angle optimum a donc été abandonnée

6) Angle au sommet: c'est l'angle RiveSud / pointF / Rive Nord.

7) Angle dépointage :pour une configuration de capteur donnée, *cette valeur indique l'angle maximum de dépointage admissible entre le plan focal du capteur et la direction du soleil, à un instant donné* . En dessous de cette valeur, tous les rayons solaires qui frappent le miroir primaire sont renvoyés dans le CPC, et donc sur la pupille de sortie du CPC. Au delà de cette valeur, il faut effectuer un repointage (manuel ou automatique) du capteur.

Attention: c'est la *demi valeur* de l'angle de dépointage qui est affichée (même remarque que pour le diamètre du soleil). Ainsi, dans cet exemple, le plan focal peut s'éloigner de  $1.32^\circ$  de part et d'autre du pointage parfait.

Enfin, la valeur affichée résulte d'un calcul théorique, et ne tient pas compte des imperfections de construction, de la qualité du miroir etc.

En pratique, on constate que, lorsque la valeur calculée de l'angle de dépointage est supérieure à  $1^\circ$ , le capteur devient très aisément manoeuvrable manuellement, de l'ordre de quelques repointages sur une plage quotidienne de six heures de travail.

### 8) Le CPC

Les calculs sont effectués selon la théorie du CPC,

L'axe de symétrie du CPC est installé sur le plan bissecteur, la pupille d'entrée du CPC est installée sur le foyer, elle est donc perpendiculaire au plan bissecteur.

La pupille de sortie a été introduite comme paramètre, et l'angle d'acceptance résulte des autres paramètres concernant le miroir du premier étage; les autres caractéristiques du CPC (*pupille d'entrée et hauteur*) en découlent.

*L'angle d'acceptance* est l'angle d'incidence maximum sous lequel les rayons peuvent frapper la pupille d'entrée et être redirigés vers la pupille de sortie.

Là aussi, il s'agit d'un demi-angle. Dans cet exemple, les rayons peuvent parvenir sous un angle de  $30.7^\circ$  de part *et d'autre* du plan de symétrie de CPC.

Si, dans certains cas de figure, le CPC apparaissait trop imposant, noter que l'on peut effectuer une troncature du CPC sans effet majeur sur son fonctionnement (voir les travaux théoriques sur le sujet). C'est la nouvelle pupille d'entrée qui serait alors installée au point F.

9) Largeur de la tache à 9h00: les rayons solaire réfléchis par le miroir forment un ruban et non une ligne, en raison du diamètre apparent du soleil. La largeur de la tache varie selon la distance entre le miroir et le foyer (plus importante en rive Sud) et en fonction de l'heure (plus importante à 9h00 qu'à midi). La valeur affichée est la *demi-largeur* de la tache.

Il existe une relation entre la largeur de la tache, la largeur de la pupille d'entrée, et l'angle de débattement admissible.

10) Concentration géométrique : C'est un des points-clés du capteur, cf Section précédente

11) Ombre mini du CPC: le programme affiche la zone d'ombre due au CPC. Mais il ne s'agit que d'une valeur théorique, qui tient compte de la pupille d'entrée du CPC sans tenir compte de la taille du bouilleur, de l'épaisseur de l'isolation du CPC ni de son capot en tôle; ce n'est donc qu'une indication. En tous cas, il faut que l'angle affiché ici soit nettement inférieur à l'angle introduit dans les paramètres, sinon il faut modifier ce dernier, ce qui n'empêchera pas, une fois que les plans de construction ont été esquissés, de révérifier l'ensemble.

La rubrique VISUALISATION à droite de l'écran d'accueil permet

-de tracer sur écran le capteur, le CPC, et le circuit des différents rayons lumineux dans le capteur et le CPC

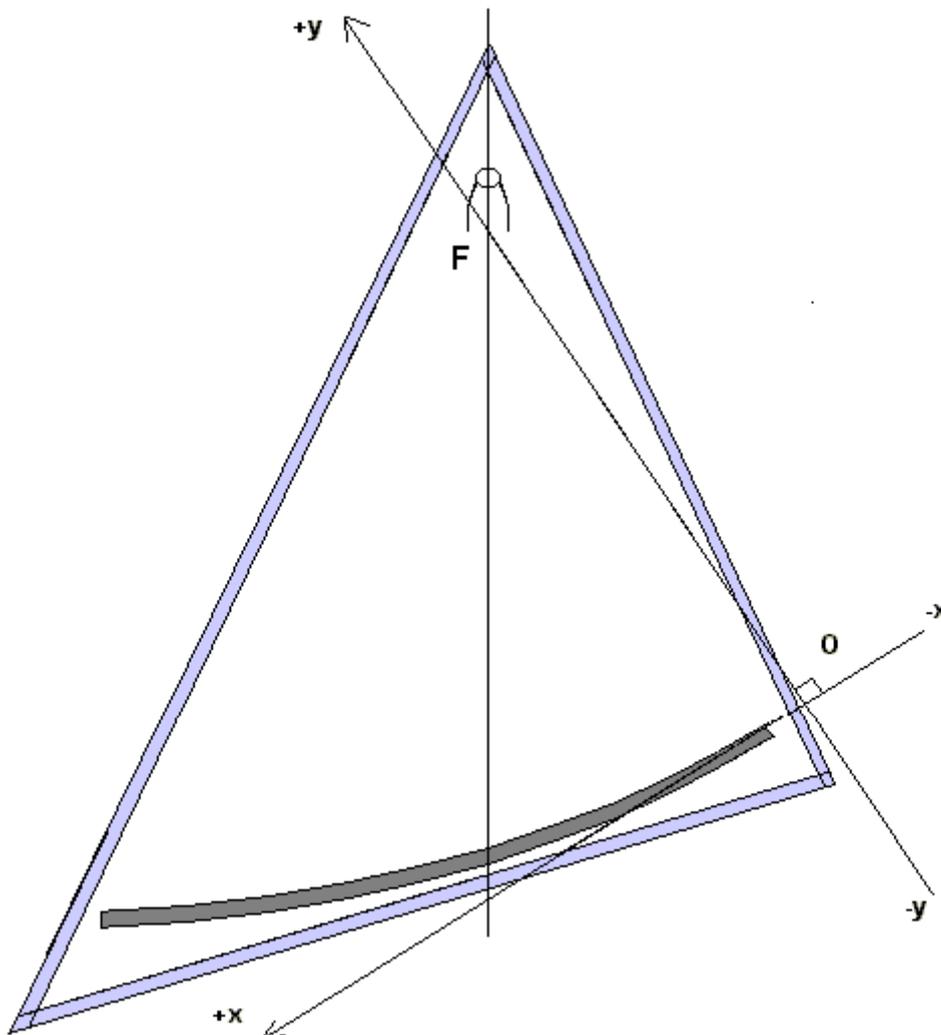
- de tracer sur imprimante la forme du CPC à l'échelle 1, pour gabarit

Cette rubrique n'est pas développée ici.

### §3) APRES LA PHASE DE CONCEPTION

Une fois achevée la phase de conception, on dispose de toutes les cotes essentielles, dans un système d'axes  $xOy$ .

Il faudra ensuite définir l'encombrement matériel du miroir (épaisseur, supports....) et du CPC (isolation, capot en tôle, ...). On pourra alors dessiner, dans ce même système d'axes, la coupe de la structure tubulaire reliant miroir et CPC: ce sera l'objet du chapitre III "Etude"



#### § 4) CAPTEUR SOLAIRE ET ARCHITECTURE NAVALE

La conception d'un capteur du type "Soleil-Vapeur" est comparable, sur de nombreux points, au problème d'architecture navale lors de la conception d'un voilier: le capteur n'est-il pas une "voile solaire » ?

En architecture navale, les éléments naturels sont les mêmes pour tous: le vent, la mer, la poussée d'Archimède, les lois de la physique, etc... Néanmoins, il existe une variété infinie de bateaux à voiles, on en a construit pendant des milliers d'années, et on continue encore à en concevoir, tous différents par telles ou telles particularités, en fonction de l'objectif choisi: bateau très petit ou très grand, bateau rapide ou pour transporter des marchandises lourdes, bateau sportif difficile à manoeuvrer ou bateau de promenade qui convient à un débutant, etc... Il en est de même pour les planches à voile.

Et pour un même type de bateau ou de planche à voile, les performances ne seront pas les mêmes selon l'utilisateur; certains seront déjà loin au large, alors que d'autres seront à peine sortis du port...

Le capteur de 2 m<sup>2</sup> est un "petit bateau multi-usages, tout à fait adapté à l'apprentissage en matière d'énergie solaire"

## SECTION III QUELQUES CONFIGURATIONS DU CAPTEUR

### §1) MIROIR DE 2.50 M

**1 A)**  
miroir 2.50 m.  
pupille 0.055 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

Focale du miroir: 2.00  
Angle entre rive Nord et plan focal: 4.5  
Diamètre du soleil: 0.533  
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)  
Largeur de la pupille de sortie du CPC: 0.055  
Largeur développée du miroir: 2.5

**Ombre mini du CPC**  
Abscisse ombre : 0.079300039  
Angle ombre : 2.271481276

**Valeurs Calculées**  
(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Abscisse rive Nord : 0.157160428  
Abscisse rive Sud : 2.502419938  
Largeur apparente : 2.345259510

Angle rive Sud : 64.060606104  
Angle plan bissecteur : 34.280303078  
Angle optimum : 50.171345950  
Angle au sommet : 59.560606104  
Angle dépointage : 0.854978068

Angle acceptance CPC : 30.852363024  
Pupille d'entrée CPC : 0.107248506  
Hauteur du CPC : 0.135804859

Largeur tache à 9.00h : 0.042174072  
Concentration géom.: 42.641082764

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**1 B)**  
miroir 2.50 m.  
pupille 0.075 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

Focale du miroir: 2.00  
Angle entre rive Nord et plan focal: 5.5  
Diamètre du soleil: 0.533  
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)  
Largeur de la pupille de sortie du CPC: 0.075  
Largeur développée du miroir: 2.5

**Ombre mini du CPC**  
Abscisse ombre : 0.108163685  
Angle ombre : 3.097906351

**Valeurs Calculées**  
(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Abscisse rive Nord : 0.192133778  
Abscisse rive Sud : 2.532048566  
Largeur apparente : 2.339914788

Angle rive Sud : 64.668614888  
Angle plan bissecteur : 35.084307476  
Angle optimum : 51.363735812  
Angle au sommet : 59.168614888  
Angle dépointage : 1.231774668

Angle acceptance CPC : 31.032741184  
Pupille d'entrée CPC : 0.145481968  
Hauteur du CPC : 0.183234549

Largeur tache à 9.00h : 0.042373954  
Concentration géom.: 31.198863983

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**1 C)**  
miroir  
2.50 m  
pupille  
0.125 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Valeurs Calculées**

Focale du miroir:   
 Angle entre rive Nord et plan focal:   
 Diamètre du soleil:   
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)  
 Largeur de la pupille de sortie du CPC:   
 Largeur développée du miroir:

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre :   
 Angle ombre :

Abscisse rive Nord :   
 Abscisse rive Sud :   
 Largeur apparente :   
(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud :   
 Angle plan bissecteur :   
 Angle optimum :   
 Angle au sommet :   
 Angle dépointage :

Angle acceptance CPC :   
 Pupille d'entrée CPC :   
 Hauteur du CPC :

Largeur tache à 9.00h :   
 Concentration géom.:

Annuler Aide Calculer  
 Imprimer Quitter

## § 2 ) MIROIR DE 2.00m,

**2 A)**  
miroir 2.00 m  
pupille 0.045 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Valeurs Calculées**

Focale du miroir:	1.60	Abscisse rive Nord :	0.125728344
Angle entre rive Nord et plan focal:	4.5	Abscisse rive Sud :	2.001935980
Diamètre du soleil:	0.533 <small>(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)</small>	Largeur apparente :	1.876207636
Largeur de la pupille de sortie du CPC:	0.045	<b>(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)</b>	
Largeur développée du miroir:	2.00	Angle rive Sud :	64.060606104
<b>Ombre mini du CPC</b>		Angle plan bissecteur :	34.280303078
Abscisse ombre :	0.064899832	Angle optimum :	50.171345950
Angle ombre :	2.323735476	Angle au sommet :	59.560606104
		Angle dépointage :	0.878598927
		Angle acceptance CPC :	30.875983884
		Pupille d'entrée CPC :	0.087688268
		Hauteur du CPC :	0.110958491
		Largeur tache à 9.00h :	0.033739258
		Concentration géom.:	41.693504333

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**2 B)**  
miroir 2.00 m  
pupille 0.060 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Valeurs Calculées**

Focale du miroir:	1.60	Abscisse rive Nord :	0.153707025
Angle entre rive Nord et plan focal:	5.5	Abscisse rive Sud :	2.025638883
Diamètre du soleil:	0.533 <small>(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)</small>	Largeur apparente :	1.871931859
Largeur de la pupille de sortie du CPC:	0.060	<b>(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)</b>	
Largeur développée du miroir:	2.00	Angle rive Sud :	64.668614888
<b>Ombre mini du CPC</b>		Angle plan bissecteur :	35.084307476
Abscisse ombre :	0.086530946	Angle optimum :	51.363735812
Angle ombre :	3.097906351	Angle au sommet :	59.168614888
		Angle dépointage :	1.231774647
		Angle acceptance CPC :	31.032741163
		Pupille d'entrée CPC :	0.116385575
		Hauteur du CPC :	0.146587639
		Largeur tache à 9.00h :	0.033899164
		Concentration géom.:	31.198863983

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**2 C)**  
miroir  
2.00 m  
pupille  
0.100 m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Valeurs Calculées**

Focale du miroir:

Angle entre rive Nord et plan focal:

Diamètre du soleil:   
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)

Largeur de la pupille de sortie du CPC:

Largeur développée du miroir:

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre:

Angle ombre:

Abscisse rive Nord:

Abscisse rive Sud:

Largeur apparente:

(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud:

Angle plan bissecteur:

Angle optimum:

Angle au sommet:

Angle dépointage:

Angle acceptance CPC:

Pupille d'entrée CPC:

Hauteur du CPC:

Largeur tache à 9.00h:

Concentration géom.:

Annuler Aide Calculer

Imprimer Quitter

### § 3 ) MIROIR DE 1.25m,

**3 A)**  
miroir  
1.25 m  
pupille  
0.030m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

Focale du miroir:

Angle entre rive Nord et plan focal:

Diamètre du soleil:   
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)

Largeur de la pupille de sortie du CPC:

Largeur développée du miroir:

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre :

Angle ombre :

**Valeurs Calculées**

Abscisse rive Nord :

Abscisse rive Sud :

Largeur apparente :

(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud :

Angle plan bissecteur :

Angle optimum :

Angle au sommet :

Angle dépointage :

Angle acceptance CPC :

Pupille d'entrée CPC :

Hauteur du CPC :

Largeur tache à 9.00h :

Concentration géom.:

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**3 B)**  
miroir  
1.25 m  
pupille  
0.040m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

Focale du miroir:

Angle entre rive Nord et plan focal:

Diamètre du soleil:   
(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)

Largeur de la pupille de sortie du CPC:

Largeur développée du miroir:

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre :

Angle ombre :

**Valeurs Calculées**

Abscisse rive Nord :

Abscisse rive Sud :

Largeur apparente :

(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud :

Angle plan bissecteur :

Angle optimum :

Angle au sommet :

Angle dépointage :

Angle acceptance CPC :

Pupille d'entrée CPC :

Hauteur du CPC :

Largeur tache à 9.00h :

Concentration géom.:

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**3 C)**  
miroir  
1.25 m  
pupille  
0.065m

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

**Valeurs Calculées**

Focale du miroir: 1.00  
Angle entre rive Nord et plan focal: 9.0  
Diamètre du soleil: 0.533  
(0,533 = 32 minutes d'arc par défaut)  
Largeur de la pupille de sortie du CPC: 0.065  
Largeur développée du miroir: 1.25

**Ombre mini du CPC**

Abscisse ombre : 0.092338234  
Angle ombre : 5.286836624

Abscisse rive Nord : 0.157403414  
Abscisse rive Sud : 1.317651949  
Largeur apparente : 1.160248535  
(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)

Angle rive Sud : 66.755860227  
Angle plan bissecteur : 37.877930166  
Angle optimum : 55.513709538  
Angle au sommet : 57.755860227  
Angle dépointage : 2.237131554

Angle acceptance CPC : 31.330231180  
Pupille d'entrée CPC : 0.125007242  
Hauteur du CPC : 0.156067943

Largeur tache à 9.00h : 0.021542250  
Concentration géom.: 17.849977493

Annuler Aide Calculer  
Imprimer Quitter

**Configurations 1A, 2A et 3A:** le taux de concentration supérieur à 40 permet un haut niveau de température, mais l'angle de dépointage inférieur à  $0.7^\circ$  nécessite une conduite très attentive du capteur, sauf à automatiser le suivi du soleil

**Configurations 1B, 2B, 3B:** l'angle de dépointage légèrement supérieur à  $1^\circ$  autorise une conduite manuelle tout à fait acceptable. Avec un taux de concentration de l'ordre de 30, ce type de capteur a permis une production continue de vapeur jusqu'à  $164^\circ/6$  bar et plus

**Configurations 1C, 2C, 3C:** la conduite du capteur est très facile, (angle de dépointage de près de  $2^\circ$ ), mais, en raison du taux de concentration inférieur à 20, le niveau de température sera moins élevé, et la surface de pupille de sortie offerte aux pertes thermiques est plus élevée. Ce type de configuration sera à utiliser avec prudence

En conclusion, la "fenêtre de calcul" d'un capteur du type "Soleil-Vapeur" est très étroite.

## SECTION IV - LE SOLEIL, LA TERRE ET LE CAPTEUR

La course apparente du soleil peut être décrite par la variation de deux angles en fonction du temps: la hauteur qui est l'angle que fait le soleil avec le plan horizontal, et l'azimut qui est l'angle que fait le soleil avec le Sud. La seule contrainte de ce capteur et de maintenir le plan focal pointé vers le soleil. L'angle à prendre en compte pour orienter le plan focal du capteur n'est donc pas la hauteur du soleil. *L'angle à prendre en compte pour orienter le plan focal du capteur est la projection de l'angle de hauteur du soleil dans un plan orthogonal au plan focal et au plan horizontal.* Cette projection atténue la variation de l'angle de rotation du capteur autour du midi solaire.

Pour ce qui nous concerne, il en résulte une conséquence bien contrariante: un capteur concentrateur cylindre-parabolique orienté Est Ouest nécessite *aussi* un suivi du soleil au cours de la journée. Toutefois l'amplitude de ce suivi est bien moindre que dans le cas d'un capteur parabolique à poursuite intégrale, ou que dans le cas d'un capteur cylindro-parabolique orienté Nord-Sud.

Heureusement, le CPC va nous faciliter la tâche: il permet le fonctionnement du capteur, même s'il n'est pas parfaitement pointé, à l'intérieur toutefois d'une fourchette : "l'angle de dépointage admissible". Une poursuite précise et automatisée n'est pas nécessaire, on peut se contenter d'une poursuite manuelle, avec quelques repointages sur la plage des six heures de fonctionnement quotidien.

Le capteur est conçu pour fonctionner pendant six heures par jour, de 9h00 à 15 h00 solaires. En deçà et au delà de ces horaires, l'effet cosinus horaire et la variation de l'angle de rotation sont considérés comme trop importants.

### § 1 ) LE SOLEIL ET LA TERRE

#### A) ROTATION DE LA TERRE SUR ELLE MÊME: PÔLES, MÉRIDIDIEN ET ANGLE HORAIRE

La rotation de la terre sur elle même s'effectue selon un axe passant par les pôles Nord et Sud.

Un méridien est un demi cercle passant par les pôles

La rotation de la terre sur elle même s'effectue en 24 heures en moyenne. L'angle horaire  $\omega$  varie donc de  $360/24 = 15^\circ$  par heure.  $\omega = 0$  lorsque le soleil est dans le plan du méridien local. Pour tous les lieux situés sur ce méridien le soleil est alors au zénith, il est midi en Temps Solaire Vrai.

On compte  $\omega$  positivement vers l'Ouest, et négativement vers l'Est

*Pour ce qui est de la rotation de la terre sur elle même, l'instant de référence est le midi solaire en TSV Temps Solaire Vrai, lorsque  $\omega = 0$*

Nota: l'angle horaire  $\omega$  est différent de l'azimut  $\alpha$ , qui est l'angle entre la projection de la direction du soleil sur l'horizontale, et le Sud. On n'aura pas ici à utiliser  $\alpha$

#### B ) EQUATEUR ET LATITUDES

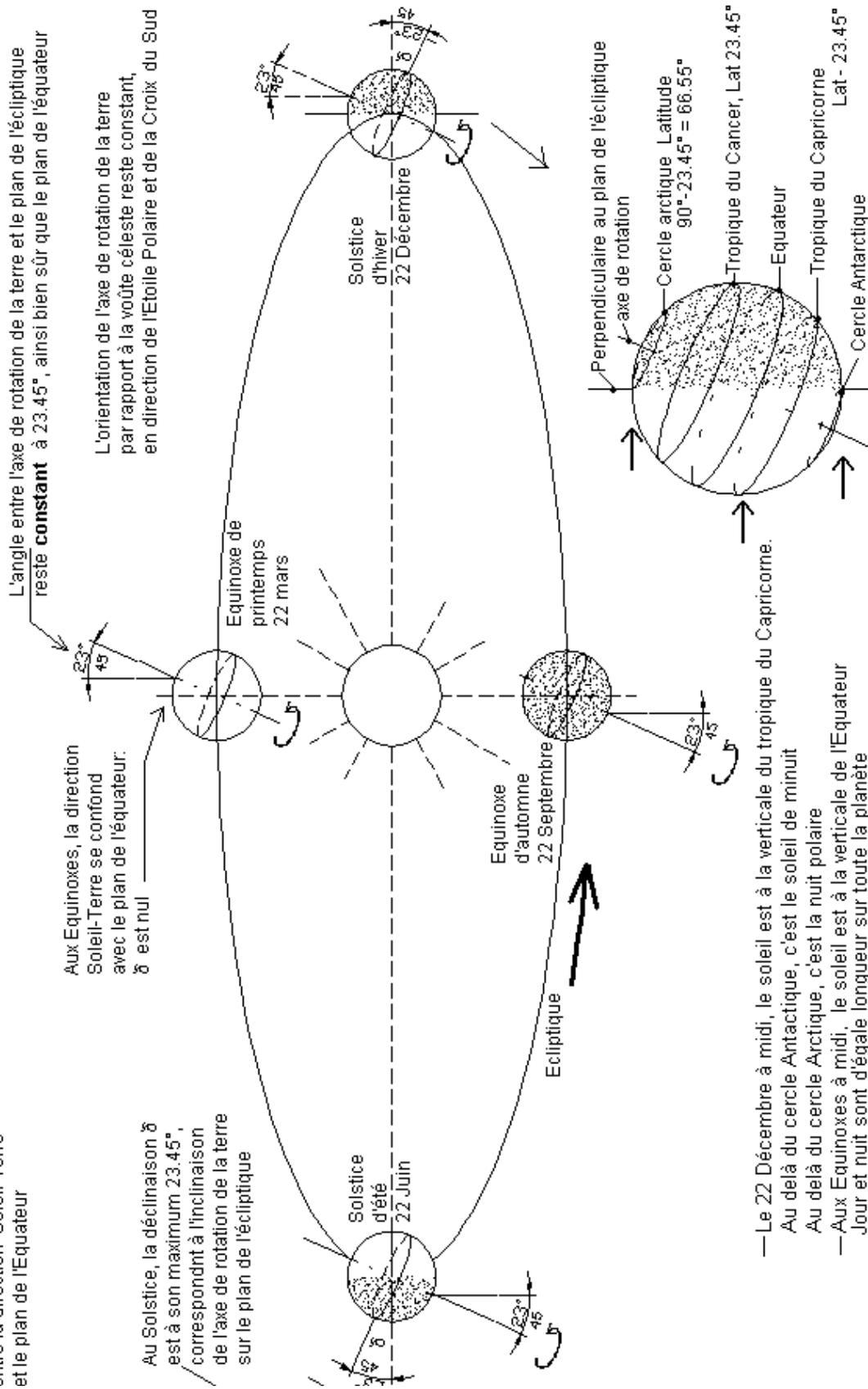
Le plan de l'équateur terrestre est un plan passant par le centre de la terre et perpendiculaire à l'axe de rotation.

Les latitudes sont des cercles parallèles au plan de l'équateur. Une latitude  $\varphi$  est comptée de 0 à  $90^\circ$  à partir de l'équateur, positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud

*Pour ce qui est de la latitude, le plan de référence est l'équateur, où  $\varphi = 0$ .*

## la Terre et le Soleil

La déclinaison  $\delta$  est l'angle **variable** entre la direction Soleil-Terre et le plan de l'Equateur



- Le 22 Décembre à midi, le soleil est à la verticale du tropique du Capricorne.
- Au delà du cercle Arctique, c'est le soleil de minuit
- Au delà du cercle Arctique, c'est la nuit polaire
- Aux Equinoxes à midi, le soleil est à la verticale de l'Equateur
- Jour et nuit sont d'égal longueur sur toute la planète

### C ) ROTATION DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

La terre tourne autour du soleil selon un plan dit plan de l'écliptique.

La rotation s'effectue en une année, dite année tropique, d'une durée de 365 jours et environ 6 heures (d'où la nécessité d'une année bissextile tous les 4 ans.)

L'axe de rotation de la terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique selon un angle de  $23.45^\circ$  en degrés décimaux.

D ) LA DÉCLINAISON  $\delta$  est l'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial de la terre.

En observant la figure ci dessus, on remarque que, à l'instant de l'Equinoxe de printemps ou d'automne, -et seulement à ces instants là-, un rayon provenant du soleil se confond avec le plan équatorial. la déclinaison est alors nulle. Après l'Equinoxe, la déclinaison augmente jusqu'à atteindre, un maximum de  $23.45^\circ$  correspondant à l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de l'écliptique. Cet instant est nommé Solstice.. Puis la déclinaison diminue jusqu'à l'équinoxe suivant.

Les variations de la déclinaison rythment les saisons au cours de l'année en raison des variations de l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface de la terre en un lieu donné, en plus des variations horaires au cours de la journée.

La déclinaison varie de  $-23.45^\circ$  au Solstice d'hiver à  $+23.45^\circ$  au Solstice d'été, Pour calculer sa variation au cours de l'année, on utilisera ici une formule approchée mais largement suffisante pour notre propos:

$\delta = 23.45 \sin JD$ , avec  $JD = (n-81)*360/365$  en degrés,  $n$  étant le quantième de l'année, c'est à dire le nombre de jours écoulés depuis le début de l'année,

Le graphique ci dessous représente, sur la ligne en pointillés, les variations de la déclinaison, nulle aux équinoxes, négative en hiver, et positive en été.

Sous le graphique, un tableau indique, pour quelques journées par mois et pour toute l'année,

- colonne 1: la date

- colonne 2: le quantième de l'année

- colonne 3 la valeur de  $\delta$

On remarquera que la valeur de la déclinaison est totalement indépendante de la latitude.

Il n'y a pas coïncidence entre le début de l'année civile au 1er Janvier et le début de l'année tropique à l'équinoxe du 22 mars, d'où le terme "n-81" dans le calcul de JD, le 22 Mars jour de l'équinoxe étant le 81ème jour de l'année civile.

*Pour ce qui est de la déclinaison, les deux instants de référence sont les équinoxes, lorsque  $\delta = 0$ .*

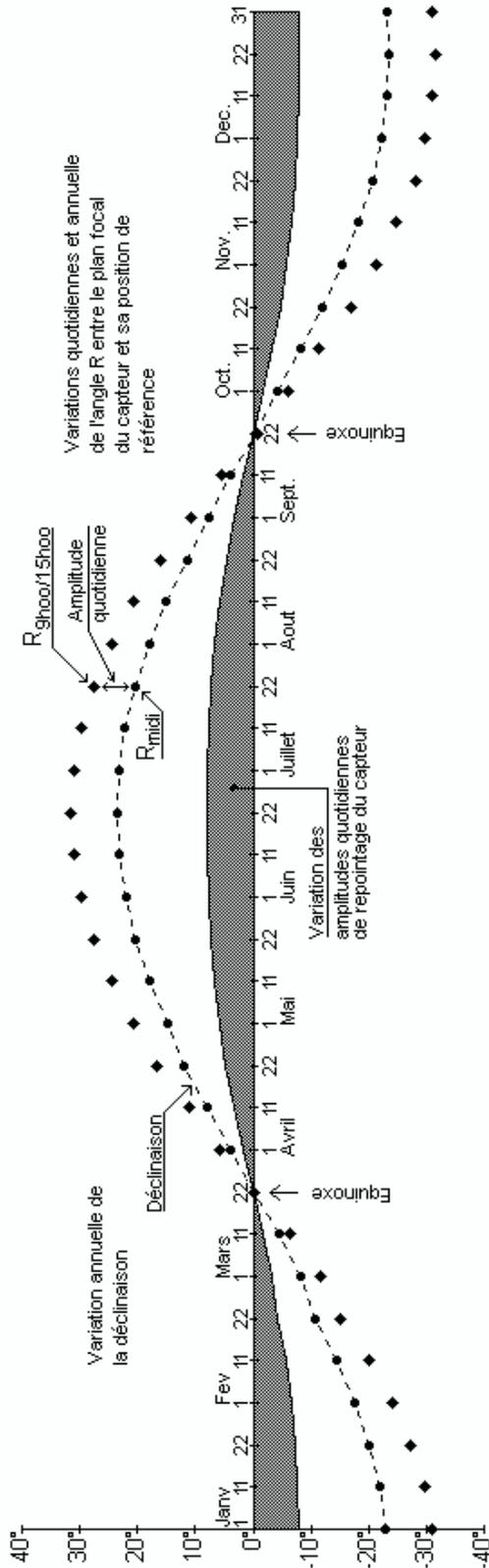
### E ) LA HAUTEUR DU SOLEIL AU COURS DE LA JOURNÉE.

La hauteur  $h$  du soleil varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison  $\delta$ , de l'angle horaire  $\omega$ , et de la latitude  $\varphi$ , de façon telle que

$$\sin h = \cos \delta * \cos \omega * \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi$$

Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître, quels que soient le jour, l'heure et le lieu, la hauteur du soleil sur l'horizon .Elle ne nous sera pas utile ici, puisque, s'agissant d'un capteur cylindre-parabolique orienté Est-Ouest, ce n'est pas la hauteur du soleil sur l'horizon qui nous intéresse, mais uniquement sa projection sur un plan orthogonal au plan focal et au plan horizontal. Toutefois cette formule permettra, à titre indicatif, de faire des comparaisons.

# Le Soleil et le Capteur



Date	n		σ		R		R		R		
	Quantité	en °	Déclinaison	en °	à midi	en °	à 9h00	en °	à 15h00	en °	
Janvier	1	23.01	23.01	-30.99	-7.98	Janv	1	11	22	31	
11	11	-21.90	21.90	-29.62	-7.72	Fev	1	11	22	31	
22	22	-19.93	19.93	-27.15	-7.22	Mars	1	11	22	31	
Fevrier	1	17.52	17.52	-24.05	-6.54	Avril	1	11	22	31	
11	42	-14.59	14.59	-20.21	-5.62	Mai	1	11	22	31	
22	53	-10.87	10.87	-15.19	-4.32	Juin	1	11	22	31	
Mars*	1	8.29	-8.29	-11.65	-3.35	Juillet	1	11	22	31	
11	70	-4.41	-4.41	-6.23	-1.82	Août	1	11	22	31	
22	81	0.00	0.00	0.00	0.00	Sept.	1	11	22	31	
Avril	1	91	4.02	4.02	5.67	1.65	Oct.	1	11	22	31
11	101	7.91	7.91	11.12	3.21	Nov.	1	11	22	31	
22	112	11.93	11.93	16.63	4.71	Dec.	1	11	22	31	

Date	n		σ		R		R		R		
	Quantité	en °	Déclinaison	en °	à midi	en °	à 9h00	en °	à 15h00	en °	
Septem.	1	244	7.72	7.72	10.86	3.13	Septem.	1	244	7.72	
11	254	3.82	3.82	5.39	1.57	11	254	3.82	3.82	5.39	
22	265	-0.61	-0.61	-0.86	-0.25	22	265	-0.61	-0.61	-0.86	
Octobre	1	274	-4.22	-4.22	-5.95	-1.74	Octobre	1	274	-4.22	-4.22
11	284	-8.10	-8.10	-11.39	-3.28	11	284	-8.10	-8.10	-11.39	
22	295	-12.10	-12.10	-16.87	-4.77	22	295	-12.10	-12.10	-16.87	
Novemb.	1	305	-15.36	-15.36	-21.23	-5.87	Novemb.	1	305	-15.36	-15.36
11	315	-18.17	-18.17	-24.90	-6.73	11	315	-18.17	-18.17	-24.90	
22	326	-20.64	-20.64	-28.04	-7.40	22	326	-20.64	-20.64	-28.04	
Décem.	1	335	-22.11	-22.11	-29.88	-7.77	Décem.	1	335	-22.11	-22.11
11	345	-23.12	-23.12	-31.12	-8.00	11	345	-23.12	-23.12	-31.12	
22	356	-23.44	-23.44	-31.52	-8.08	22	356	-23.44	-23.44	-31.52	
31	365	-23.09	-23.09	-31.08	-8.00	31	365	-23.09	-23.09	-31.08	

\* Pour les années bissextiles, on peut décaler le tableau d'une journée à partir de cette date

## § 2) LE SOLEIL ET LE CAPTEUR

Le propos est de connaître

-l'amplitude quotidienne des réglages à effectuer sur le capteur entre 9h00 et 15h00

-l'amplitude annuelle

Le plan focal du capteur doit toujours être orienté vers le soleil

*La position de référence du plan focal est sa position au jour de l'équinoxe à midi, lorsque  $\delta = 0$  et  $\omega = 0$*

R est l'angle entre d'une part le plan focal à un jour donné et à une heure donnée, et d'autre part sa position de référence

$$R = \text{ArcTg}(R_0) - \pi/2$$

$$\text{avec } \text{tg}R_0 = \cos\omega * \text{tg}(\delta + \pi/2)$$

si  $R_0$  est négatif, rajouter  $\pi$  ( $180^\circ$ ) à  $R_0$  pour trouver une valeur positive ( $\text{ArcTg} +/\pi$ ), ce qui est le cas entre l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne.

*R est indépendant de la latitude.*

### 1 Variation de $R_{\text{midi}}$ au cours de l'année, à l'heure de midi

à midi,  $\omega = 0$ ,  $\cos\omega = 1$

Le tableau ci dessus indique, pour quelques jours par mois tout au long de l'année, la valeur de  $R_{\text{midi}}$  (colonne 4). Sur le graphique, les marques rondes figurent la position du plan focal par rapport à sa référence et, en toute logique, pour l'heure de midi, les variations saisonnières de  $R_{\text{midi}}$  sont strictement identiques aux variations saisonnières de la déclinaison.

### 2-Variation de $R_{9/15}$ au cours de l'année, à 9h00 ou à 15h00

La variation est symétrique de part et d'autre du midi solaire

Voir sur le tableau la colonne 5,

La variation de  $R_{9/15}$  au cours de l'année, figurée sur le graphique par les marques en losange, est plus importante que la variation de  $R_{\text{midi}}$

### 3- Amplitude des variations quotidiennes du plan focal, entre 9h00 et midi, et entre midi et 15h00

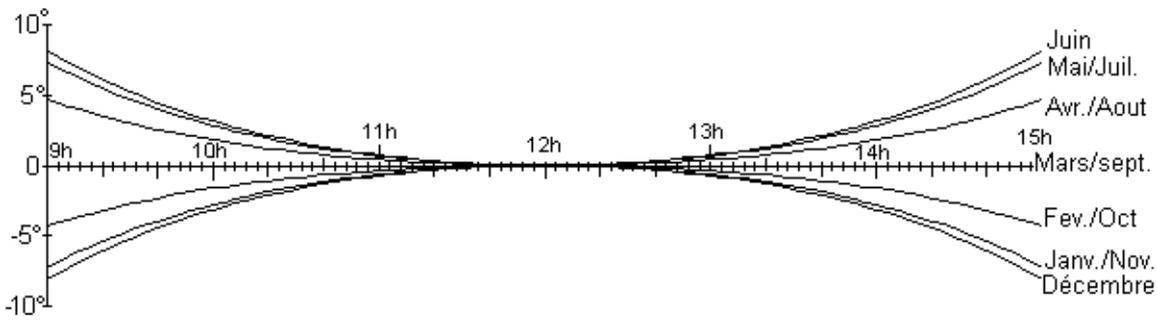
Voir sur le tableau la colonne 6:

L'amplitude quotidienne, représentée par une courbe en trait continu sur le graphique, varie de  $8^\circ$  aux solstices à  $0^\circ$  aux équinoxes,

- Cette amplitude maximum de  $8^\circ$  est à rapprocher de l'angle de dépointage maximum autorisé grâce à l'utilisation d'un CPC, dont la valeur a été fournie par le programme de conception. On peut désormais appréhender le nombre d'interventions de repointage du capteur au cours d'une journée. Cette amplitude est nettement inférieure à celle de la hauteur du soleil pendant le même période.

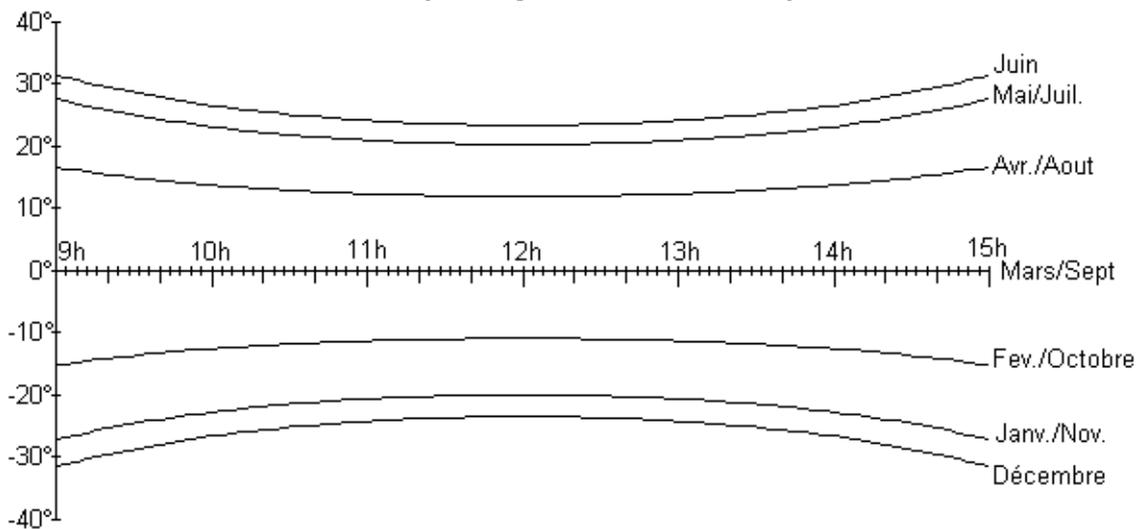
Les courbes ci dessous représentent, pour la journée du 22 de chaque mois, l'amplitude des variations quotidiennes du plan focal. On peut désormais appréhender la répartition des opérations de repointage du capteur au cours de la journée.

### Débattement quotidien pour la journée du 22 de chaque mois



### 4- Amplitude annuelle

#### Débattement annuel pour la journée du 22 de chaque mois



Ce sont les mêmes courbes que le graphique précédent, mais on a opéré un changement des origines pour chaque jour.

Sur une année, l'amplitude maximum de R est de  $8.08 + 23.45 + 23.45 + 8.08 = 63.06^\circ$

Le dispositif de pointage du capteur devra permettre ce débattement.

Les calculs de pointage ci dessus sont valables pour tous types de capteurs cylindro paraboliques orientés Est- Ouest

Noter qu' en théorie ni la saison ni la latitude du lieu d'implantation n'ont d' influence sur le rendement du capteur, si ce n'est que la climatologie varie usuellement avec la saison: si la saison des pluies est néfaste au capteur, c'est à cause de la pluie, et non à cause de la saison au sens astral. En se rapprochant des pôles toutefois, les rayons solaires doivent traverser une épaisseur d'atmosphère beaucoup plus importante que près de l'Equateur, leur parcours en est d'autant plus perturbé.

**Dans le cas d'une conduite manuelle du capteur, le conducteur n'a que faire de toutes ces considérations astronomiques: son geste est identique à celui d'un éclairagiste de théâtre qui dirige son projecteur de poursuite sur un acteur.**

### § 3 ) LA TERRE ET LE CAPTEUR

Les variations d'inclinaison du plan focal décrites dans les § ci dessus sont totalement indépendantes du lieu d'implantation du capteur. Il convient désormais de s'intéresser à la position du plan focal, donc à la position de la structure du capteur, par rapport à l'horizontale de son lieu d'implantation. Il faut ici tenir compte de la longitude du lieu d'implantation.

Le propos est de connaître, en pratique, les différentes positions du capteur au cours de l'année en un lieu donné (sans pour autant chercher une extrême précision puisqu'il ne s'agit pas de programmer un suivi automatisé).

L'angle entre d'une part l'horizontale du lieu d'implantation et d'autre part le plan focal dans sa position de référence à midi à l'équinoxe, est égal à la colatitude.

Colatitude =  $90^\circ$  - latitude

Les calculs des § précédents permettent de déterminer la position du capteur à toute heure de la journée et pour toutes les latitudes. La longitude n'intervient aucunement dans le calcul des positions

Le Tableau des Positions du Capteur présente différents cas de figure

- **en fonction de la latitude:**  $42^\circ$ ,  $31^\circ$ ,  $20^\circ$  et Equateur. Les positions Hémisphère Nord/Hémisphère Sud sont symétriques en miroir

- **en fonction de la saison:** position centrale de référence aux équinoxes, puis positions extrêmes aux solstices, plus deux positions intermédiaires.

- **en fonction de l'heure:** position centrale de référence à midi, puis positions extrêmes à 9h00 et 15h00.

Pour toutes les silhouettes, le capteur est placé sur l'hémisphère Nord, il est vu par un observateur placé à l'extrémité Est du capteur, qui dirige son regard vers l'Ouest. Le Sud et le soleil sont à sa gauche, le Nord à sa droite.

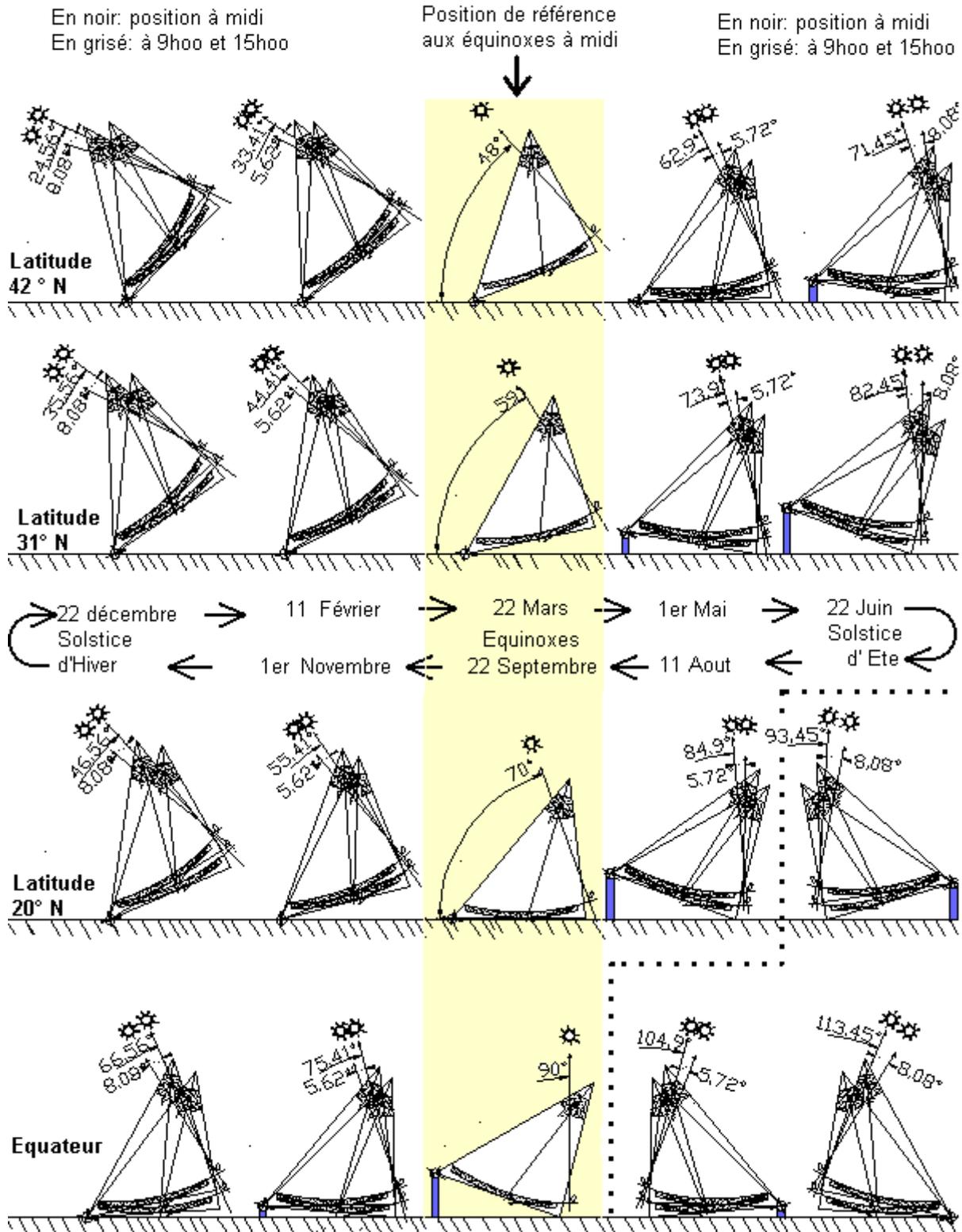
La silhouette du capteur est orientée de telle sorte que le plan focal soit orienté vers le soleil, au jour dit et à l'heure dite. Noter que, sur le capteur comme sur la maquette, le plan focal n'est pas matérialisé. Ce serait totalement inutile: le conducteur se repère en vérifiant que les rayons arrivent bien dans le CPC, et n'a que faire du plan focal (comme d'ailleurs de tous les éléments de géométrie ou d'astronomie décrits dans ce chapitre)

Les différents schémas mettent en évidence l'intérêt de pouvoir rehausser le support d'axe de pivotement du capteur lorsque l'on s'approche de l'été (à des dates différentes selon la latitude)

Ils mettent également en évidence l'intérêt de procéder à un retournement du capteur, en zone tropicale et en été (à droite de la ligne en pointillé). notamment pour une meilleure répartition de l'eau à vaporiser à l'intérieur du tube chaudière.

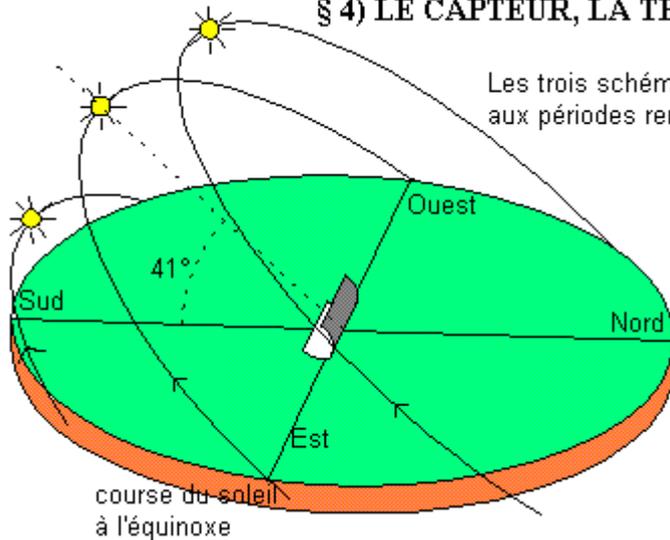
**Le chapitre X "positions du capteur" reprend les schémas ci dessous, mais d'une façon plus détaillée, pour l'hémisphère Nord et pour l'hémisphère Sud..**

Tableau des positions du capteur, en fonction de la latitude et de la saison



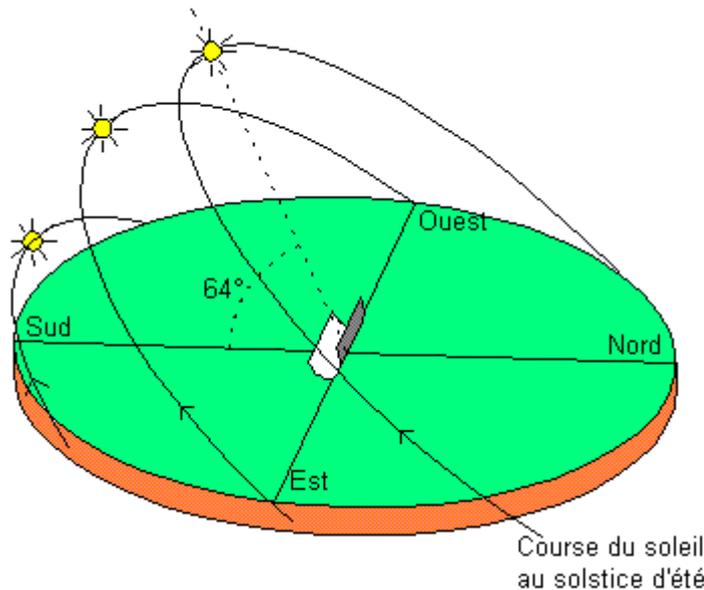
## § 4) LE CAPTEUR, LA TERRE ET LE SOLEIL *vus* du CELESCOPE

Les trois schémas décrivent la course du soleil vu depuis Paris, aux périodes remarquables de l'année. Paris est à la latitude  $49^\circ\text{N}$



Le schéma ci contre représente la position du soleil et du capteur à midi solaire aux jours des équinoxes (22 mars / 22 septembre). Le soleil est à la hauteur de  $90^\circ - 49^\circ = 41^\circ$  au dessus de l'horizon.

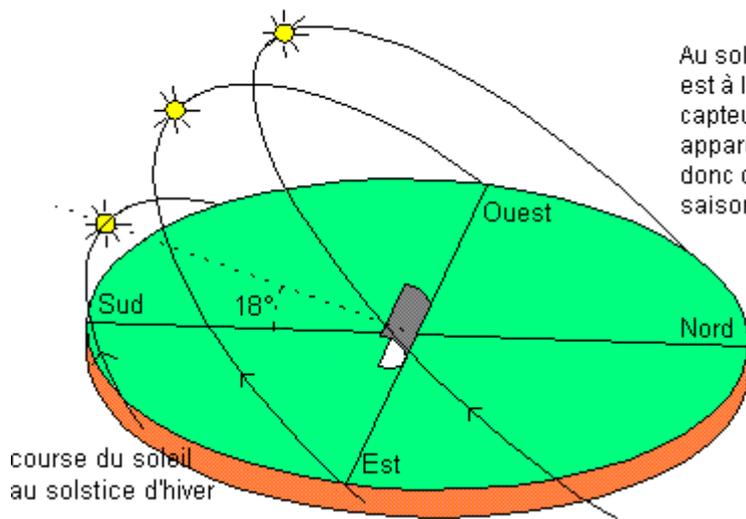
La course apparente du soleil décrit un plan dans le ciel, et le capteur est situé dans ce plan. Il est donc inutile d'effectuer des repointages du capteur au cours de la journée



Au solstice d'été (24 Juin) et au midi solaire, le soleil est à la hauteur de  $41 + 23 = 64^\circ$ .

Les  $23^\circ$  correspondent à l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de l'écliptique, inclinaison qui est à l'origine des saisons Printemps -Ete – Automne – Hiver.

La course apparente du soleil dans le ciel est toujours un plan, mais le capteur n'est pas situé dans ce plan. Il est donc nécessaire de procéder à des repointages au cours de la journée, d'autant plus importants que l'on s'éloigne de part et d'autre du midi solaire. A 9h00 et à 15h00 solaires, le dépointage maximum par rapport à midi est de  $8^\circ$ . Grâce au Concentrateur Parabolique Composé de Winston, qui joue le rôle d'entonnoir, le suivi du soleil ne nécessite pas une très grande précision. Le suivi est donc effectué manuellement par le conducteur du capteur .



Au solstice d'hiver et au midi solaire, le soleil est à la hauteur de  $41 - 19 = 18^\circ$  Nord. Le capteur n'est pas dans le plan de la course apparente du soleil dans le ciel, et nécessite donc des repointages symétriques à ceux de la saison opposée.

Les schémas ont été établis d'après le *Celestoscope* de Bernard Melguen "La Mesure du Temps" Editions Apogée - 2009

N.B. Le capteur schématisé sur ces croquis est un miroir cylindro parabolique symétrique, afin d'illustrer plus commodément le propos. Le miroir utilisé dans le capteur de Soleil-vapeur est différent, c'est une fraction de demi parabole

## § 5) MESURE DU FLUX SOLAIRE, ET EFFET COSINUS HORAIRE.

### 1 Rayonnement direct et rayonnement diffus

Le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement direct (provenant en droite ligne du soleil) et du rayonnement diffus (qui est reflété par les nuages, l'atmosphère humide, etc...). Dans le cas d'un capteur concentrateur, les rayons solaires sont réfléchis sur un miroir, pour être redirigés en un point le plus précis possible. Le rayonnement diffus, dénommé également rayonnement indirect, qui vient d'un peu partout et selon toutes les directions, ne peut être pris en compte. Seul le rayonnement direct nous intéresse, parce que c'est le seul auquel on sait appliquer facilement les lois de l'optique.

Même en absence de nuages, une atmosphère tropicale très chargée en humidité peut diffracter les rayons solaires, au point d'élever notablement la proportion de rayonnement indirect. Il en est de même lorsque, se rapprochant des pôles, la couche d'atmosphère à traverser par le rayonnement solaire devient très épaisse.

### 2 Le problème de la méthode de mesure du flux solaire

- Avant même de mesurer les performances du capteur, il faut mesurer le flux solaire. Usuellement, les météorologues mesurent la quantité d'énergie reçue par unité de surface à l'horizontale du lieu de mesure. Pour ce qui est du capteur, il convient de mesurer la quantité d'énergie reçue par unité de surface mesurée perpendiculairement au flux, à minorer ensuite éventuellement en raison de l'effet cosinus horaire: les deux propos sont complètement différents.

Quels chiffres retenir? Ainsi sous un flux solaire direct strictement identique, à midi au jour de l'équinoxe, le climatologue mesurera par exemple 800 Watt/m<sup>2</sup> à l'équateur, mais seulement 530 Watt/m<sup>2</sup> à Brest, à la latitude 48.5° (800W \* COS48.5° = 530W). Pour l'énergéticien, les deux flux sont identiques.

Les chiffres d'ensoleillement fournis par les services météorologiques sont bien sûr indiscutables, mais sont à utiliser avec la plus grande prudence. Sous des latitudes assez élevées, par une journée d'hiver avec un ciel bien dégagé, et pour peu que l'on tienne compte de l'ensoleillement reçu horizontalement au sol, le rendement du capteur pourrait atteindre, voire dépasser 100%...

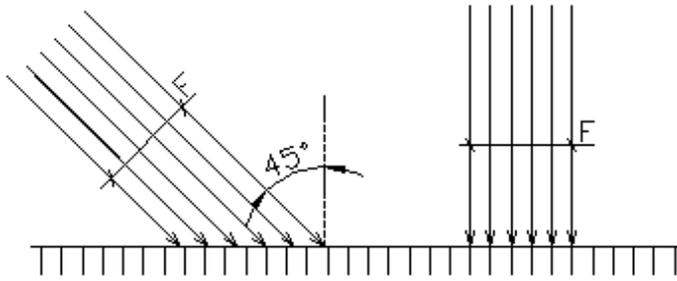
### 3 L'effet cosinus horaire

Au cours de la journée, seul le plan focal du capteur est orienté vers le soleil. Du point de vue de la tôle du miroir du premier étage, le rayonnement solaire est reçu selon un angle d'incidence qui varie tout au long de la journée comme l'angle horaire  $\omega$ . le matin à 9h00 le flux solaire est reçu de l'Est sous un angle d'incidence de 45°, qui diminue progressivement jusqu'à être nul à midi, pour augmenter ensuite jusqu'à 15 h00.

L'angle d'incidence est mesuré par rapport à la position de référence de midi.

Pour un flux solaire constant, la quantité d'énergie reçue par le miroir varie donc tout au long de la journée. En prenant pour référence la quantité reçue à midi, la quantité reçue à 9h00 est réduite à  $\text{Cos}45^\circ = 0.707$ :

*Pour un flux solaire constant, la quantité d'énergie reçue varie selon le Cosinus de l'angle horaire  $\omega$ .*



La variation du flux solaire en fonction de l'heure correspond à la table des Cosinus de 45 à 0°. Avant 9h00 et après 15 h00, on considère que l'angle d'incidence est trop important

La faible variation quotidienne de pointage du capteur cylindro-parabolique orienté Est Ouest a donc un coût, à savoir: l'effet cosinus horaire, qui n'existe pas dans une configuration de capteur parabolique. Ce coût découle des choix initiaux exposés au début de chapitre, qui bien sûr peuvent être remis en cause, mais alors il s'agirait d'un autre type de capteur, doté d'un autre panel d'avantages et d'inconvénients.

L'effet cosinus horaire a plusieurs conséquences

- L'utilisateur remarquera assez vite que le capteur fonctionne beaucoup mieux à l'heure midi que le matin ou le soir. Avec un peu d'habitude, il en tiendra compte dans l'utilisation optimum de l'énergie disponible au cours de la journée.

- la mesure des performances d'un capteur devient brusquement compliquée: quels chiffres retenir? Si l'on ne tient pas compte de l'heure à laquelle ils ont été recueillis, des dispersions de l'ordre de 50% dans les résultats deviennent incompréhensibles

La solution retenue (pour le moment) consiste à *mesurer l'ensoleillement direct perpendiculairement au flux solaire*, « Direct Normal Incidence », alias DNI, puis à *tenir compte ensuite de l'effet cosinus horaire*.

Une table de calcul de l'effet cosinus horaire est disponible au chapitre « Performances », Section II.

Nota c'est en raison de l'angle d'incidence que le capteur est équipé de prolongations du miroir, en Est et en Ouest, qui travaillent alternativement le matin et le soir, pour que le CPC soit insolé durant toute la période de 9 à 15 h00. Mais il s'agit là des conséquences géométriques de la variation de l'angle d'incidence (loi de Descartes sur la réflexion d'un miroir), et non de son aspect énergétique. La longueur des élancements est égale à la longueur de la focale. Avant 9h00 toutefois, bien que la totalité du CPC ne soit pas insolé, on peut commencer le préchauffage de la chaudière pour être en production de vapeur à 9h00

On peut enfin signaler ici un effet collatéral de l'effet cosinus: selon la documentation fournie par les fabricants, le taux de réflectivité des miroirs diminue lorsque l'angle d'incidence du rayonnement reçu s'éloigne de la normale au miroir. Il y a donc aggravation de la perte énergétique due à l'effet cosinus.

## § 6) L'EQUATION DES TEMPS

Il s'agit en ce qui nous concerne d'une question tout à fait secondaire, mais qu'il est néanmoins nécessaire d'aborder.

On considère usuellement que la terre effectue une rotation en 24 heures, mais cette durée de 24 heures n'est qu'une moyenne, et l'heure GMT de midi fournie par l'observatoire de Greenwich près de Londres est une heure moyenne: Greenwich *Mean Time*. Au cours de l'année les irrégularités varient entre -15 et +16 minutes.

Les irrégularités de rotation de la terre sont sans effet mesurable sur l'utilisation du capteur: l'utilisateur ne peut s'en apercevoir, compte tenu notamment des autres facteurs qui entrent en jeu (intensité de l'ensoleillement du moment etc)...

Toutefois, la structure tubulaire du capteur est une forme de cadran solaire, notamment par l'effet d'ombre des tubes les uns sur les autres, qui permet au premier coup d'œil à midi de vérifier s'il est correctement installé. Supposons qu'un capteur soit consciencieusement installé d'après la position du soleil à la mi février: au début novembre, il laisserait apparaître une erreur d'une demi-heure, soit une erreur de  $\approx 7^\circ$  sur  $\omega$ . Il est donc préférable d'être prévenu....

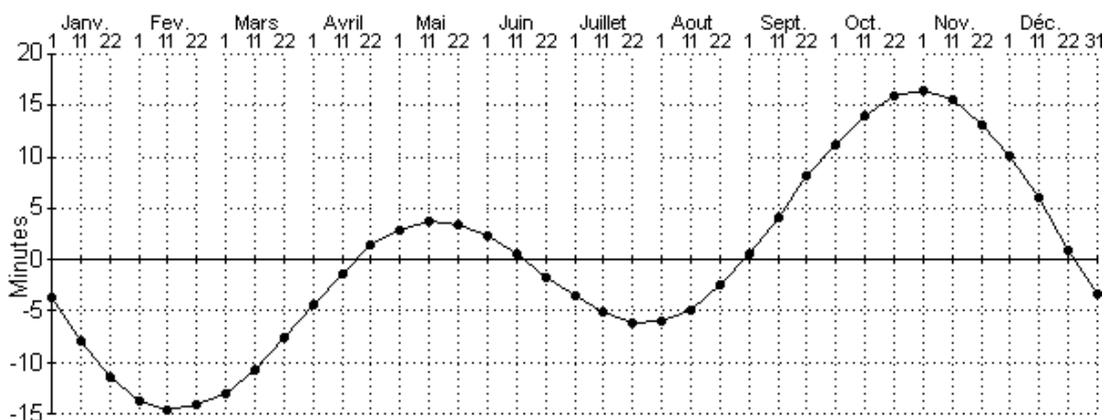
Le décalage entre le Temps Solaire Vrai et le Temps Solaire Moyen est fourni par la formule (approchée) dite de correction de l'Equation des Temps

$$ET = 9.87\sin 2JD - 7.53\cos JD - 1.5 \sin JD \text{ en minutes et fractions décimales de minutes.}$$

(Valeur de JD: voir "déclinaison")

$$TSV = TSM + ET$$

**Courbe de correction de l'Equation des Temps**



Sur les cadrans solaires élaborés, une courbe appelée analemne, en forme de 8, installée sur le midi solaire, permet de passer du TSV au Temps Solaire Moyen

Pour implanter un capteur, il convient aussi de tenir compte de l'heure légale et de la correction de longitude ( $\omega$  varie de  $15^\circ$  par heure, soit  $1^\circ$  pour 4 minutes). On peut préférer recourir à la boussole pour trouver le Nord, mais alors il faut tenir compte... de la déclinaison magnétique. Tous ces aspects seront abordés dans le chapitre "Installation du capteur".

Notons simplement ici que l'implantation du capteur ne requiert pas une précision parfaite de l'ordre de la fraction de degré ou même du degré: les variations du midi solaire vrai, de plus ou moins 4 degrés, sont là pour lever les éventuelles appréhensions en la matière.

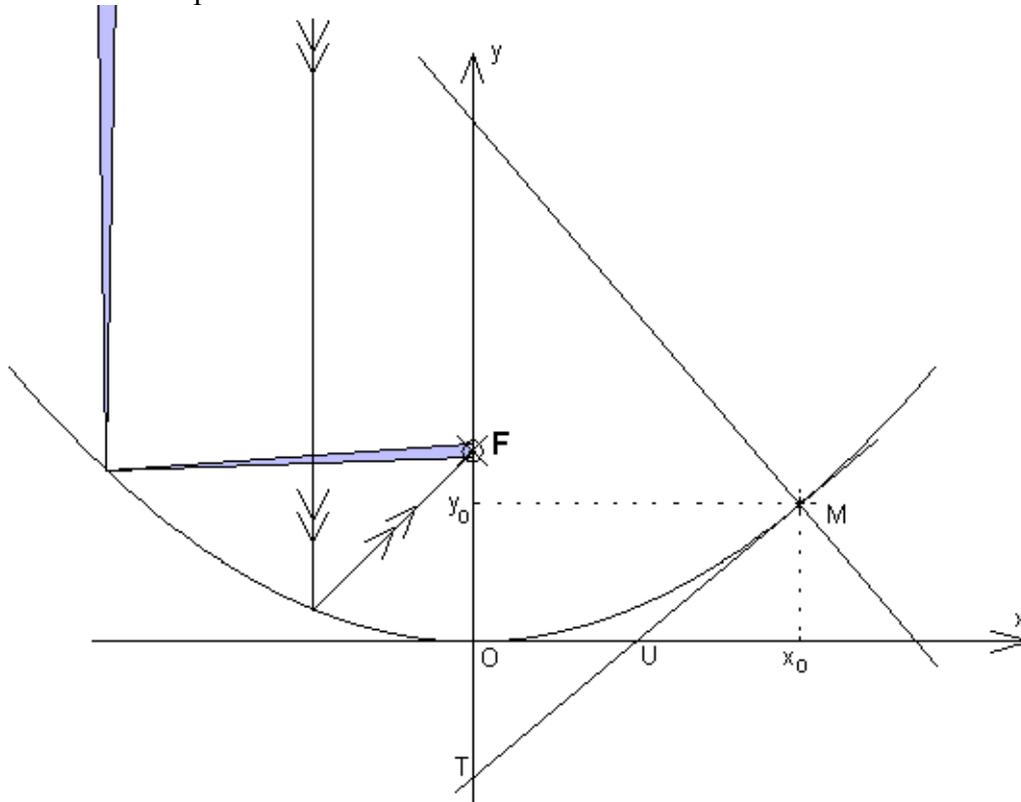
## SECTION V - AU SUJET DU CPC

### § 1) PRELIMINAIRES: LA PARABOLE, rappel de quelques fondamentaux

La parabole est une courbe dont l'équation est  $y = x^2/4f$

$f$  est la distance focale entre l'origine  $O$  et le foyer  $F$ .

Le sommet de la parabole est en  $O$ .



Soit  $M(x_0, y_0)$  un point  
situé sur la parabole

La tangente en  $M$  a pour équation  $y = \frac{1}{2} \frac{x_0 x}{f} - y_0$

La normale en  $M$  a pour équation  $y = -2 \frac{x f}{x_0} + 2f + y_0$

$U$  est au milieu de  $Ox_0$

$U$  est au milieu de  $TM$

$O$  est au milieu de  $Ty_0$

Sur un miroir de forme parabolique, un rayon incident parallèle à l'axe de symétrie de la parabole sera réfléchi au foyer  $F$

Pour ce qui est du premier étage du capteur, le soleil étant considéré à l'infini, on considère également que tous les rayons incidents sont parallèles entre eux. Il faut néanmoins tenir compte de la dimension du soleil vu de la terre, c'est à dire un disque de diamètre apparent  $0.533^\circ$  (en degrés décimaux). L'image du soleil renvoyée par un point du miroir du premier étage n'est pas un point, mais une tache. S'agissant d'un miroir cylindro-parabolique, c'est plus précisément un ruban lumineux qui est redirigé vers de CPC.

Compte tenu de l'allongement du rayon réfléchi, le ruban est d'autant plus large

- que le point de réflexion du miroir est éloigné du sommet de la parabole (le point "Rive Sud" est le plus éloigné)

- que l'on s'éloigne de l'heure de midi,

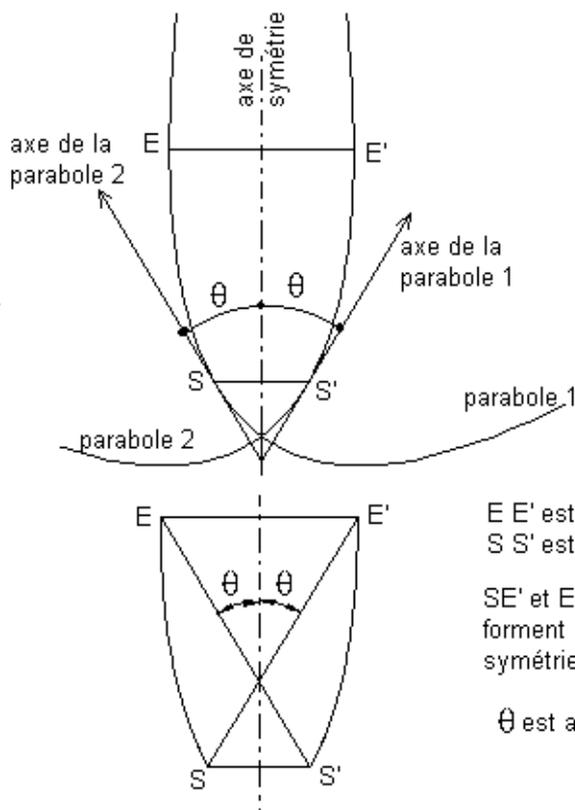
## § 2) PRESENTATION GENERALE du CPC ET SOURCES DOCUMENTAIRES

Le Concentrateur Parabolique Composé ("Compound Parabolic Concentrator") est une construction optique conçue dans les années 1960 par un Américain R. Winston, un Soviétique V. Baranov, et un Allemand M Plocke, chacun séparément.. Utilisé en physique des hautes énergies notamment pour mesurer l'effet Cerenkov, son application à l'énergie solaire fut développée par R. Winston dans les années 1970; Les CPC sont très utilisés actuellement à l'intérieur de capteurs plans, pour renforcer la concentration; ils sont alors orientés "ouverture vers le soleil"

La documentation sur le CPC est disponible

- sur le site du Laboratoire de R Winston à l'institut Enrico Fermi de Chicago.
- "Pour la Science " N° 163 de Mai 1991, avec un article de R. Winston
- Revue "Solar Energy": plusieurs dizaines d'articles y ont été consacrés au CPC
- "Le Rayonnement solaire, conversion thermique et applications", pp 192 à 196, de R. Bernard, G Menguy et M Schwartz" chez Technique et Documentation, 1979, (épuisé)
- "Conversion thermique du rayonnement solaire", pp 259 à 266, J-M Chasseriaux, chez Dunod, 1984 (épuisé)
- en tapant les mots clés "concentrateur parabolique composé" ou compound parabolic concentrator" sur un moteur de recherche

## § 3) LE CPC: CONSTRUCTION, CALCULS, DESSIN ET PROPRIETES



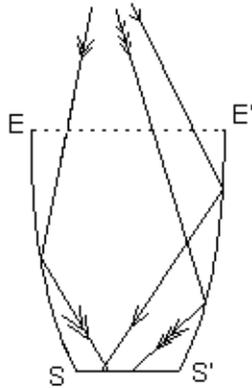
On dispose deux paraboles de part et d'autre d'un axe de symétrie. Les axes des paraboles forment un angle  $\theta$  avec l'axe de symétrie. Chaque parabole passe par le foyer de l'autre, en S et S'. En E et E', les tangentes des paraboles sont parallèles à l'axe de symétrie.

On ne conserve ensuite que les arcs ES et E'S'

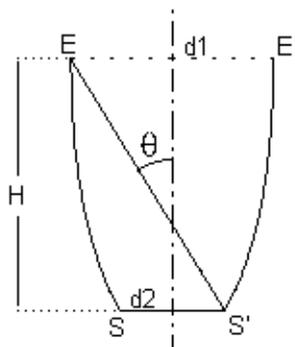
E E' est la pupille d'entrée du CPC  
S S' est la pupille de sortie

SE' et ES' sont parallèles aux axes des paraboles, et forment donc également un angle  $\theta$  avec l'axe de symétrie

$\theta$  est appelé Angle d'acceptance du CPC



La propriété principale du CPC est que tout rayon lumineux traversant la pupille d'entrée, et à condition que son angle d'incidence soit au plus égal à  $\theta$ , est renvoyé sur un point situé sur la pupille de sortie. Les rayons arrivent directement ou indirectement, après réflexion sur une des parois. Les rayons arrivent sur la pupille de sortie sous toutes les incidences possibles. En conséquence, le CPC ne forme pas d'image, mais ce n'est pas gênant pour notre application. Si la pupille de sortie est parfaitement absorbante, aucun rayon lumineux entrant avec une incidence comprise entre 0 et  $\theta$  ne peut sortir du CPC, ce que confirme l'expérience avec le rayon lumineux d'un stylo laser. Le CPC apparaît noir à un observateur situé dans l'angle d'ouverture: ce sont là des moyens simples de vérifier la qualité de construction du CPC. Par contre, un rayon entrant dans le CPC avec une incidence supérieure à  $\theta$  finira par en ressortir.

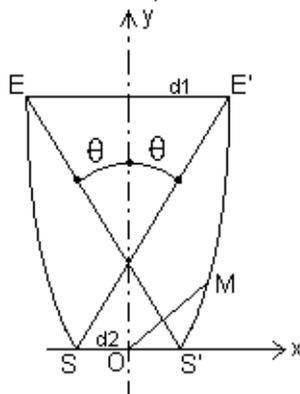


Taux de concentration: soit  $d_1$  la longueur de la pupille d'entrée  $EE'$ , et  $d_2$  la longueur de la pupille de sortie  $SS'$

Le taux de concentration  $C = \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{\sin \theta}$

Noter que le taux de concentration du CPC est complètement différent du taux de concentration du capteur. Dans le cas du capteur Soleil-Vapeur, le CPC est utilisé non pas en raison de ses facultés de concentration, mais en raison de ses capacités à rediriger un faisceau de rayons non parallèles entre eux vers une cible déterminée. Le CPC est ici détourné de sa vocation originelle

La hauteur  $H = \frac{(d_1+d_2)}{2} * \cotg \theta$



Dessin des parois du CPC:

Soit le point O, à l'intersection de l'axe de symétrie et de la pupille de sortie, comme origine des axes Ox et Oy. Un point M quelconque du CPC est donné par les équations paramétriques

$$x = \frac{d_2(1 + \sin \theta) * \sin (\varphi - \theta)}{1 - \cos \varphi} - \frac{d_2}{2}$$

$$y = \frac{d_2 (1 + \sin \theta) * \cos (\varphi - \theta)}{1 - \cos \varphi}$$

le paramètre  $\varphi$  varie entre  $\varphi = 2\theta$  au point E  
et  $\varphi = \frac{180^\circ}{2} + \theta$  au point S

Note concernant la terminologie: l'angle d'acceptance  $\theta$  est plus précisément le demi angle d'acceptance du CPC. Il en sera de même ultérieurement pour la dénomination de l'angle de dépointage du capteur. Comme pour les calculs astronomiques du § précédent, ces valeurs angulaires expriment un débattement par rapport à une position médiane qui est la position de référence.

### La troncature du CPC

On peut remarquer que la partie des miroirs située près de la zone d'entrée du CPC est assez peu active, car le rayonnement incident et les miroirs y sont pratiquement parallèles. Si les dimensions

d'un CPC sont trop importantes, on peut donc sans grandes conséquences en supprimer la partie "supérieure". Les effets de la troncature du CPC ont fait l'objets de plusieurs publications.

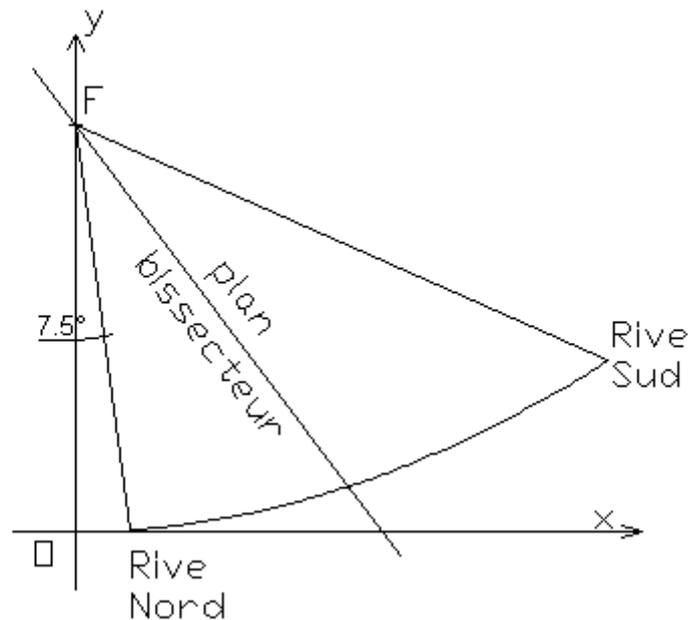
#### § 4) LE CPC ET LE CAPTEUR

Soit par exemple un capteur avec une focale de 1,00 m, dont le miroir du premier étage mesure 1,25 m, et pour lequel on envisage un taux de concentration de l'ordre de 25, soit une pupille de sortie de 50 mm. On prédimensionne l'angle mort à 7,5°, sous réserve de vérifications ultérieures. Le programme de conception fournit alors les éléments suivants

**Caractéristiques du miroir et du CPC**  
 Les angles sont en degrés décimaux, les longueurs en mètres

Focale du miroir:	1.00	<b>Valeurs Calculées</b>	
Angle entre rive Nord et plan focal:	7.5	Abscisse rive Nord :	0.131086926
Diamètre du soleil:	0.533 <small>(0.533 = 32 minutes d'arc par défaut)</small>	Abscisse rive Sud :	1.295563001
Largeur de la pupille de sortie du CPC:	0.050	Largeur apparente :	1.164476076
Largeur développée du miroir:	1.25	<small>(Les angles sont donnés par rapport au plan focal)</small>	
<b>Ombre mini du CPC</b>		Angle rive Sud :	65.868840234
Abscisse ombre :	0.071682192	Angle plan bissecteur :	36.684420161
Angle ombre :	4.105329990	Angle optimum :	53.739429713
		Angle au sommet :	58.368840234
		Angle dépointage :	1.695741729
		Angle acceptance CPC :	31.095971114
		Pupille d'entrée CPC :	0.096810461
		Hauteur du CPC :	0.121704590
		Largeur tache à 9.00h :	0.021388880
		Concentration géom.:	23.289522171

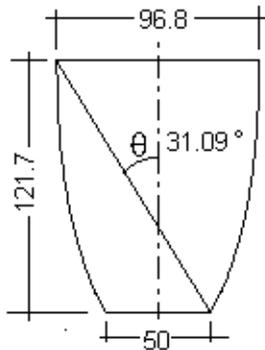
Annuler Aide Calculer



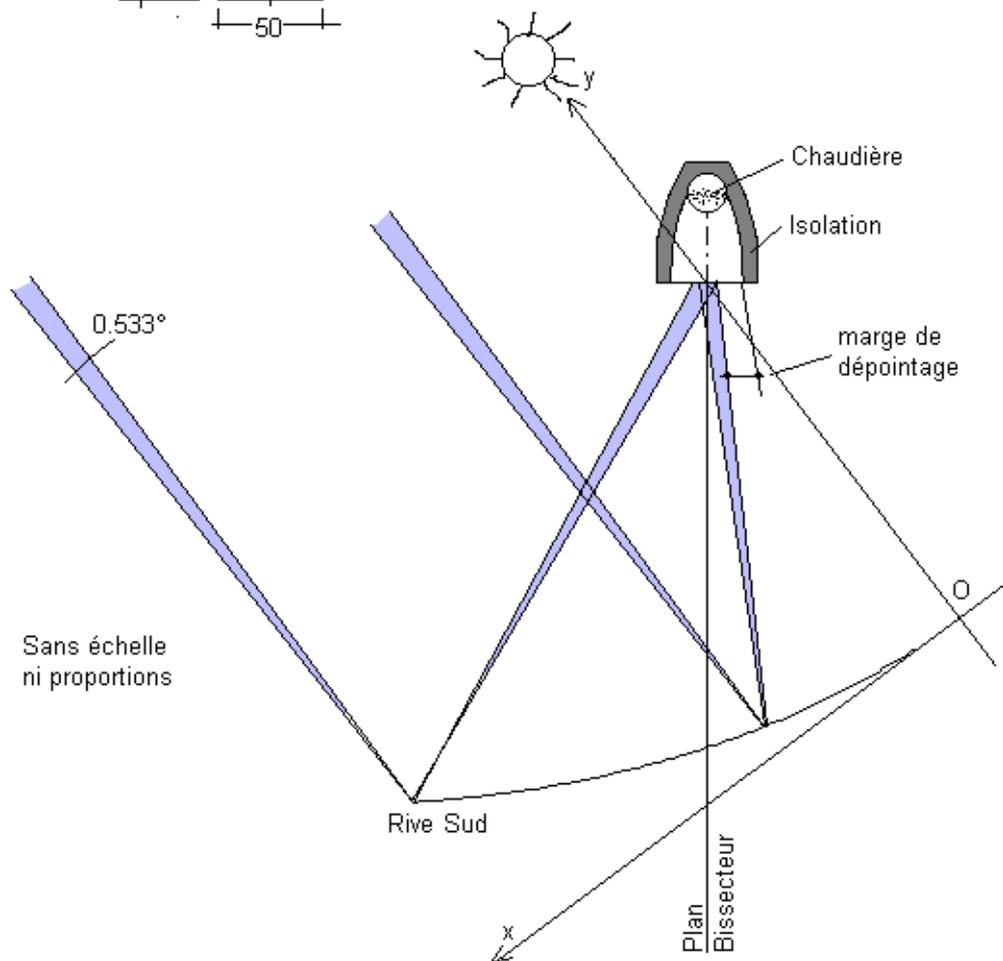
L'angle au sommet (RiveNord /F /Rive Sud) mesure bien  $58.368^\circ$ ; on s'attendrait donc à un angle d'acceptance de  $58.368/2 = 29.184^\circ$ , alors que le programme propose un angle d'acceptance de  $31.096^\circ$ . Le programme tien compte du fait que le soleil n'est pas un point, mais un disque de diamètre  $0.533$  degrés décimaux. La rive Sud étant à #  $1\,420$  mm du point F, la largeur de cette tache est au minimum de  $13.2$  mm à midi, à multiplier par  $\text{Cos}(45^\circ)$  pour 9h/15hoo soit un maximum théorique de  $18.7$  mm

Pour homogénéiser les différentes présentations, on retourne ensuite le schéma "en miroir" par rapport à l'axe des Y, et on l'oriente de façon à placer le plan bissecteur "verticalement"

On est désormais à même de construire, à côté de la parabole, un CPC avec pupille de sortie de  $50$  mm et angle d'acceptance  $31.096^\circ$ , d'où une pupille d'entrée de  $96.8$  mm, et une hauteur de  $121$  mm.



Puis on retourne le CPC, et on l'installe sur le capteur, l'axe de symétrie du CPC étant confondu avec le plan bissecteur, et la pupille d'entrée installée au foyer de la parabole



Le miroir primaire cylindro-parabolique est capable de recueillir les rayons solaires parallèles entre eux et de les faire converger vers une ligne focale; le CPC est capable de recueillir les rayons réfléchis et non parallèles entre eux, et de les rediriger vers une cible déterminée.

Si le miroir n'est pas parfaitement pointé vers le soleil, le ruban lumineux des rayons réfléchis ne sera pas axé sur la ligne focale, mais si la pupille d'entrée du CPC est notablement plus large que le ruban lumineux, et pour peu que le ruban soit situé à l'intérieur de la pupille, alors les rayons réfléchis seront redirigés vers la pupille de sortie. Le suivi parfait du soleil, automatisé et motorisé, peut être remplacé par une suite discrète de repointages à effectuer manuellement.

Outre le fait de simplifier le suivi du soleil, le CPC - bijou intellectuel- permet également de récupérer les imperfections de géométrie ou de réflectivité du miroir. Grâce à cet "entonnoir à rayons", le capteur "soleil-vapeur" est une machine rustique.

Enfin, sa forme et sa position favorisent le confinement de la chaleur à proximité du tube de vaporisation; le tube à vide, usuel en matière de capteurs cylindro-paraboliques, n'est plus indispensable.

C'est cette utilisation originale du CPC, installé "à l'envers" et gavé de rayonnement solaire par le grand miroir, qui a fait l'objet d'un brevet du 10 Oct 1996 N° 96 12588 déposé par Soleil-Vapeur

Le cheminement des rayons à l'intérieur du CPC peut être décrit à l'aide de programmes de calculs ou de logiciels du type Opticad. Il en ressort entre autres, outre la complexité du problème (notamment lorsque l'on remplace la cible plane par un tube chaudière) que la répartition du rayonnement sur la cible en fin de parcours est très hétérogène.

Pour un grand miroir de caractéristiques données, le capteur peut être équipé d'une grande variété de CPC, aux caractéristiques différentes, selon le but recherché: niveau de température ou facilité de conduite, sachant que le premier et le second évoluent en sens inverse, en fonction de la dimension de la pupille de sortie. Par précaution lors du dessin de la structure d'un capteur, il convient de prévoir l'emplacement d'un CPC "d'encombrement maximum"

La dimension de la pupille de sortie conditionne directement le taux de concentration du capteur, que l'on peut définir comme le rapport entre la largeur de la pupille de sortie, et la dimension du miroir primaire mesurée perpendiculairement au rayonnement solaire

On constate qu'un taux de concentration de l'ordre de 28 est largement suffisant pour produire de la vapeur jusqu'à 6 ou 7 bar.

On constate également que, à partir d'un angle de dépointage (ou plus précisément d'un "demi angle" de dépointage) égal ou supérieur à  $1^\circ$ , le capteur est parfaitement manoeuvrable manuellement..

### **Vers un capteur symétrique ?**

On peut envisager un capteur dont le grand miroir, moins asymétrique que ci dessus, se répartirait (fût-ce inégalement) de part et d'autre du plan focal. Il serait nécessaire de tenir compte de la dimension du CPC pour éviter un trop grand effet d'ombre. La plupart des paramètres seraient à revoir et à optimiser en fonction de la latitude du lieu d'implantation, mais aussi et surtout en fonction du type d'utilisation de l'énergie thermique produite.