

Piège hyperthermique du rayonnement solaire direct

L'invention concerne un dispositif (1) destiné à convertir le rayonnement solaire direct en une énergie thermique de haute qualité avec le minimum de pertes. Plus généralement, le dispositif peut fonctionner avec tout rayonnement spatialement étendu d'ondes planes dont les directions de propagation diffèrent de quelques degrés. Les usages de la chaleur ainsi recueillie sont notamment : fours écologiques à très hautes températures, installations de thermolyse et cycles thermodynamiques divers destinés à produire un travail mécanique, puis électrique.

L'invention s'inscrit dans la filière « hélio-thermo-électrique », et plus particulièrement dans l'énergie solaire thermodynamique. Celle-ci est déjà connue pour son rendement supérieur à celui de l'énergie solaire photovoltaïque. En effet, les rendements globaux de conversion (du soleil au réseau électrique) sont pour les meilleurs exemples connus à ce jour :

- 30% pour les installations thermoélectriques
- 12% pour les capteurs photovoltaïques

Les installations thermoélectriques ont toutes choisi la voie de la concentration du rayonnement solaire pour atteindre des hautes températures, indispensables pour avoir un cycle performant de conversion thermomécanique.

Toutefois, ces températures (environ 600°C) ne sont pas suffisamment hautes pour garantir le haut rendement de conversion thermomécanique connu dans les centrales thermiques (50% et jusqu'à 60% en cycle combiné) dont la source chaude est généralement à plus de 1000°C grâce à l'utilisation de combustibles très exothermiques (charbon, pétrole, gaz, fission nucléaire).

La présente invention est une nouvelle approche basée sur un piégeage progressif des rayons solaires permettant un rendement de conversion de l'énergie solaire directe en énergie électrique d'environ 60%, soit une performance :

- 5 - 5 fois meilleure que celle du solaire photovoltaïque,
- 2 fois meilleure que celle du solaire thermo-électrique actuel,
- voisine de celle des meilleures centrales thermiques.

10

Etat de l'art

Les techniques de concentration actuelles sont basées sur la focalisation du rayonnement en un point ou une zone spatialement limitée. On peut citer notamment :

- 15 - les systèmes optiques à transmission
 - o lentilles convergentes extrudées,
 - o lentilles à symétrie de révolution, classiques ou à disposition de Fresnel,
- les systèmes à réflexion
 - 20 o multi-miroirs plans pointant tous vers une zone commune de focalisation,
 - o miroirs cylindro-paraboliques ou paraboliques.

Les systèmes à transmission utilisent un milieu diélectrique transparent au visible et restent artisanaux. Ils ne sont pas industrialisés car la perte d'énergie solaire y est trop importante à cause :

- de leur absorption dans le domaine infrarouge,
- des réflexions parasites air/milieu : entre 5 et 10%
- 30 du flux incident perdu à chaque interface air/milieu.

La réflexion sur les miroirs est plus efficace : l'aluminium poli réfléchit 90% du flux solaire vers le foyer. L'argent poli collecte même jusqu'à 95% du flux solaire direct incident, mais s'oxyde et coûte plus cher.

35

L'étape suivante est la conversion du rayonnement collecté en énergie thermique. C'est sur cet aspect que les techniques actuelles sont très loin d'être optimales : elles utilisent des pièces fixées au foyer des miroirs collecteurs : par exemple des plaques ou des tuyaux dans lesquels circule parfois un fluide caloporteur. Cela pose deux importants problèmes :

1. D'une part, lors de son impact sur ces pièces, le rayonnement est abondamment réfléchi et/ou diffusé. Ce rayonnement non capté est définitivement perdu.

2. D'autre part, le rayonnement capté est généralement mal retenu car les pièces s'échauffent rapidement et ne sont pas isolées suffisamment. Deux phénomènes sont responsables d'importantes pertes de chaleur :

a. Pertes par diffusion thermique : sont proportionnelles à la surface des pièces et à leur différence de température avec l'atmosphère.

b. Pertes par rayonnement thermique : sont proportionnelles à la surface, et à la température absolue (en Kelvin) à l'exposant 4.

Lorsque la température T approche de 1000 Kelvin, comme les surfaces ne sont ni réduites ni isolées correctement, le système perd rapidement autant d'énergie que son miroir en collecte.

Le problème n°1 provoque une perte de plus de 10% de l'énergie collectée par le miroir, encore plus si les pièces absorbantes sont des plaques métalliques non oxydées relativement lisses et claires. Les reflets sont assez intenses pour agresser la rétine d'un observateur.

Le problème n°2 empêche d'augmenter la température du fluide caloporteur au-delà de quelques centaines de Kelvin, car sinon, le rendement de piégeage thermique, défini comme le rapport de l'énergie retenue à l'énergie incidente, est bien trop faible, voire nul.

Caractéristiques et potentiel du rayonnement solaire

Le Soleil émet une lumière jaune dont la puissance se répartit à 53% dans l'infrarouge, à 44% dans le visible et à 3% dans l'ultraviolet. Tout le rayonnement solaire peut et doit être valorisé pour une conversion hyperthermique.

Le Soleil est situé à 150 000 000 de km de la Terre et a un diamètre de 1 360 000 km, ce qui lui donne un diamètre angulaire DA depuis la Terre :

$$DA = \arctangente(136 / 15000) = 0,52^\circ$$

Toutefois, à cause des perturbations atmosphériques, il vaut mieux retenir $DA=0,6^\circ$ pour les rayons reçus sur Terre.

Chaque onde émise par un point du Soleil et parvenant sur Terre est sensiblement plane à l'échelle du dispositif.

Lorsque l'axe central (Oz) du miroir collecteur pointe précisément vers le centre apparent du Soleil (S), les rayons incidents constituent sur le miroir collecteur des ondes planes inclinées au maximum de $\pm 0,3^\circ$ dans des directions quelconques par rapport à l'axe central.

Sur Terre, la puissance solaire en très haute atmosphère vaut en moyenne 1400 W/m^2 , et 1000 W/m^2 au sol en conditions idéales : soleil au zénith, ciel très clair.

Des flux moyens de 200 W/m^2 en région très ensoleillée (plus de 2750 heures/an) sont très courants dans le bassin méditerranéen, et jusqu'à 300 W/m^2 pour des latitudes comprises entre 40° Sud et 40° Nord.

Pour obtenir la puissance électrique d'une centrale nucléaire de 1200 MW, il suffit, sur la base d'un rendement de conversion de 60% et de 200 W/m^2 de flux solaire annuel moyen, d'une surface de 10 km^2 , soit un carré de 3,2 km de côté. C'est une aire négligeable devant la surface de n'importe quel pays ou océan.

Actuellement, et au niveau mondial, il est admis que l'énergie solaire apporte environ 10 000 fois la consommation anthropique, toute activité incluse.

Solutions proposées

La présente invention reprend le principe des miroirs collecteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques. Toutefois, dans certains cas, la géométrie de ces miroirs est perfectionnée, et dans tous les cas, les moyens de conversion du rayonnement solaire en chaleur se démarquent nettement de l'art actuel, en raison des arrangements suivants :

- 10 - Le lieu de focalisation (14) du rayonnement collecté par le miroir constitue l'entrée (8) d'une enceinte de confinement de l'énergie (ECE) dont la géométrie particulière lui donne des propriétés anti-émisives.
- Le rayonnement (4) focalisé/concentré s'engouffre
 - 15 dans cette cavité où il est progressivement absorbé de 2 façons différentes :
 - o à la suite de multiples réflexions et diffusions partiellement absorbantes sur les parois de la cavité (7,9,10),
 - 20 o à la suite de son trajet entre 2 impacts successifs sur les parois (7,9,10) de la cavité lorsque celle-ci est remplie par un milieu absorbant.

La cavité peut être équipée :

- 25 - de circuits (27,30) dans lesquels circule un fluide caloporteur afin d'extraire la chaleur pour l'application choisie (four, machine à vapeur, machine de Stirling...)
- d'une ou plusieurs enveloppes (11) : ces enveloppes
 - 30 sont dotées d'une surface polie et très réfléchissante, orientées vers l'intérieur de l'enceinte et séparées par un excellent isolant thermique (12) : elles confinent l'intense rayonnement infrarouge de l'enceinte (ECE) et
 - 35 empêchent les fuites thermiques par conduction.

Miroirs de focalisation

La présente invention utilise la focalisation naturelle des rayons dans le plan focal du miroir collecteur (5). L'équation de la surface réfléchissante de ces miroirs est, dans un repère orthonormé direct (O,x,y,z) , en plaçant le sommet du miroir en 0 et en pointant l'axe Oz vers le centre apparent du soleil (S) :

- lorsque le miroir possède une symétrie de révolution autour de l'axe z (« parabolique de révolution »):

$$z(x,y) = (\text{sqrt}(x^2+y^2) - r_0)^2 / 2/p$$

- lorsque le miroir est extrudé selon l'axe x (« parabolique extrudé ») :

$$z(y)=(\text{abs}(y) - r_0)^2 / 2/p$$

où :

- * c / d désigne 'c divisé par d'
- * $\text{sqrt}(c)$ désigne la 'racine carrée de c'
- * $\text{abs}(d)$ désigne la 'valeur absolue de d'
- * p est le paramètre de plan focal ($p > 0$)
- * r_0 est le paramètre de rayon (r_0 est algébrique)
- * a^b désigne 'a puissance b'

Quels que soient les paramètres précédents, les rayons se concentrent dans le plan focal (13) placé à une distance $p/2$ de 0 en suivant l'axe Oz. Il se dégage, selon le paramètre r_0 , 4 familles de miroirs collecteurs :

- famille PRFPP si $r_0 = 0$: « Parabolique de Révolution à Foyer Principal Ponctuel » (sur Oz),
- famille PEFPR si $r_0 = 0$: « Parabolique Extrudée à Foyer Principal rectiligne » (le long de Ox),
- famille PRFPC si $r_0 \neq 0$: « Parabolique de Révolution à Foyer Principal Circulaire » (autour de Oz),
- famille PEFPBr si $r_0 \neq 0$: « Parabolique Extrudée à Foyer Principal Birectiligne » (le long de Ox),

Le caractère parabolique de tous ces miroirs (5) permet la focalisation optimale des rayons solaires directs (4) en accord avec le principe de Fermat. Néanmoins, toute forme concave sensiblement parabolique convient. En particulier, pour faciliter leur fabrication, ces miroirs peuvent devenir sphériques ou cylindriques de rayon R, le foyer (14) étant alors à une distance R/2. Dans ce cas, les équations deviennent :

- lorsque le miroir possède une symétrie de révolution autour de l'axe z (« sphérique de révolution »):

$$z(x,y) = R - \sqrt{R^2 - (\sqrt{x^2+y^2}-r_0)^2}$$

- lorsque le miroir est extrudé selon l'axe x (« cylindrique extrudé ») :

$$z(y) = R - \sqrt{R^2 - (\text{abs}(y)-r_0)^2}$$

Bien que moins efficace, le fonctionnement sera encore bon dans l'approximation de Gauss et, selon le paramètre r_0 , 4 nouvelles familles de miroirs collecteurs apparaissent :

- famille SRFPP si $r_0 = 0$: « Sphérique de Révolution à Foyer Principal Ponctuel » (sur Oz),
- famille CEFPR si $r_0 = 0$: « Cylindrique Extrudé à Foyer Principal rectiligne » (le long de Ox),
- famille SRFPC si $r_0 \neq 0$: « Sphérique de Révolution à Foyer Principal Circulaire » (autour de Oz),
- famille CEFPBr si $r_0 \neq 0$: « Cylindrique Extrudé à Foyer Principal Birectiligne » (le long de Ox).

Les miroirs PRFPP, PEFPR, SRFPP et CEFPR ($r_0=0$) sont les miroirs déjà couramment utilisés en solaire thermique à concentration ; leur foyer principal (14) est respectivement :

- ponctuel sur l'axe Oz tel que $OF=p/2$ ou $R/2$
- linéaire rectiligne le long de Ox : $z=p/2$ ou $R/2$, $y=0$

Les miroirs (PRFPC,SRFPC) ou (PEFPBr,CEFPBr), correspondant à $r_0 \neq 0$, sont quatre variantes spécifiques de la présente invention grâce au paramètre de rayon : r_0 . Leur foyer principal (14) est respectivement :

- 5 - circulaire autour de l'axe Oz tel que
 - o l'axe du cercle est Oz, son centre est C
 - o le centre C est placé en $OC = p/2$ ou $OC = R/2$
 - o le rayon du cercle vaut $\text{abs}(r_0)$
- 10 - birectiligne le long de Ox tel que
 - o $z=p/2$ ou $z=R/2$
 - o $y= \text{abs}(r_0)$ pour la ligne focale supérieure (14A)
 - o $y= -\text{abs}(r_0)$ pour la ligne focale inférieure (14B)

15 Si l'on considère 2 faisceaux symétrique par rapport à Oz qui convergent vers leur foyer principal (14,14A,14B), les miroirs (PRFPC,SRFPC) ou (PEFPBr,CEFPBr) se déclinent en 2 sous-familles :

- si $r_0 < 0$: croisement (CR) des 2 faisceaux avant le foyer,
 - 20 - si $r_0 > 0$: croisement (CR) des 2 faisceaux après le foyer.
- Ces deux variantes n'ont aucune influence sur le fonctionnement car les faisceaux sont constitués d'ondes totalement incohérentes entre elles. La variante $r_0 > 0$ respecte mieux les conditions de Gauss que $r_0 < 0$.

25 Les 8 familles et les éventuelles sous-familles de miroirs collecteurs conduisent tous les rayons solaires directs (4) à l'entrée (8) de l'enceinte ECE sous la forme d'une assemblée de faisceaux convergents dont l'angle d'ouverture AO peut être réduit autant que nécessaire :

- 30 - soit en augmentant la distance focale avec p ou R ,
- soit en limitant l'envergure du miroir,
- soit en jouant sur les 2 paramètres à la fois.

En pratique, $AO < 50$ degrés est acceptable.

La surface d'entrée (8) de l'enceinte (ECE) est ainsi la plus réduite possible bien que tous les rayons (4) réfléchis sur le miroir collecteur (5) la traversent. La géométrie de l'entrée (8) de l'enceinte (ECE) dépend du miroir (5) utilisé (tan = la fonction mathématique 'tangente'):

- Pour les familles PRFPP et SRFPP ($r_0=0$), c'est un disque (15A) de diamètre : $p \tan(DA)/2$ et $R \tan(DA)/2$
- Pour les familles PEFPR et CEFPR ($r_0=0$): c'est une bande (15C) de longueur identique à celle du miroir sur Ox, de largeur : $p \tan(DA)/2$ et $R \tan(DA)/2$
- Pour les familles PRFPC et SEFPC ($r_0 \neq 0$): c'est un anneau (15B) de rayon moyen $\text{abs}(r_0)$ et de largeur : $p \tan(DA)/2$ et $R \tan(DA)/2$
- Pour les familles PEFPBr et CEFPBr ($r_0 \neq 0$) : il s'agit de deux bandes (14A,14B) s'étendant le long de Ox, et de longueur identique à celle du miroir selon Ox :
 - o Sous-familles à croisement de faisceaux après le foyer ($r_0 > 0$) :
 - Bande supérieure (15D):
pour PEFPBr : $y = r_0 - p \tan(DA)/4$ à $y = r_0 + p \tan(DA)/4$
pour CEFPBr : $y = r_0 - R \tan(DA)/4$ à $y = r_0 + R \tan(DA)/4$
 - Bande inférieure (15E):
pour PEFPBr : $y = -r_0 + p \tan(DA)/4$ à $y = -r_0 - p \tan(DA)/4$
pour CEFPBr : $y = -r_0 + R \tan(DA)/4$ à $y = -r_0 - R \tan(DA)/4$
 - o Sous-familles à croisement de faisceaux avant le foyer ($r_0 < 0$) :
 - Bande supérieure (15D):
pour PEFPBr : $y = -r_0 + p \tan(DA)/4$ à $y = -r_0 - p \tan(DA)/4$
pour CEFPBr : $y = -r_0 + R \tan(DA)/4$ à $y = -r_0 - R \tan(DA)/4$
 - Bande inférieure (15E):
pour PEFPBr : $y = r_0 - p \tan(DA)/4$ à $y = r_0 + p \tan(DA)/4$
pour CEFPBr : $y = r_0 - R \tan(DA)/4$ à $y = r_0 + R \tan(DA)/4$

Les enceintes de confinement de l'énergie

Les enceintes de confinement de l'énergie (ECE) recueillent des faisceaux convergents à faible angle d'ouverture (AO de l'ordre de 50°) et ont une partie optiquement ouverte sur l'atmosphère. Ce sont des parois récupératrices de rayonnement à très hautes températures (jusqu'à plusieurs milliers de Kelvin) qui doivent être isolées de l'extérieur pour supprimer :

- 10 - les pertes par rayonnement en plaçant une ou plusieurs parois (11) sensiblement concentriques autour de l'enceinte (ECE) dont la face réfléchissante est tournée vers l'intérieur de l'enceinte, et l'autre face, idéalement noire, est
 - 15 tournée vers l'extérieur. Ainsi, cela permet :
 - o à tout rayonnement provenant de l'enceinte d'y retourner instantanément, et,
 - o à tout rayonnement extérieur à l'enceinte d'être absorbé par la face noire, et ainsi de revenir progressivement vers le centre l'enceinte.
 - 20 - les pertes par conduction thermique en plaçant entre les parois concentriques un excellent isolant thermique (12) comme de l'argon sous vide poussé : secondaire (10^{-6} Pa) ou moléculaire (10^{-10} Pa).

25 Les parois (7,9,10) des enceintes nécessitent d'être sommairement réfléchissantes et non diffusantes : ceci permet aux rayons collectés d'être absorbés à chaque nouvelle réflexion. Les propriétés anti-émissives des enceintes (ECE) sont obtenues :

- 30 - par la possibilité de fermer complètement l'enceinte par un clapet (26) lorsque le soleil disparaît,
- par des composés physicochimiques, déposés sur ou entre les parois de l'enceinte, capables d'absorber et retenir fortement le rayonnement infrarouge d'un
 - 35 corps de quelques milliers de Kelvin,

- avec une géométrie des parois de la enceinte obligeant tout rayon pénétrant dans l'enceinte (ECE) d'y effectuer des dizaines, voire centaines de réflexions absorbantes avant d'avoir la possibilité géométrique d'en ressortir.

C'est ce dernier point qui est crucial pour le caractère anti-émisif de l'enceinte (ECE). Les meilleures géométries anti-émisives peuvent être notamment de trois types :

- o surfaces paraboliques ou sensiblement paraboliques, à foyers de préférence confondus et à axes optiques de préférence alignés, l'une de longue focale (9,9A,9B), l'autre de courte focale (10,10A,10B) :
 - concave/concave, ou,
 - concave/convexe
 définissant une « cavité afocale » (6,6A,6B)
- o « couloirs anti-retour » (7,7A,7B) à section croissante dans le sens d'entrée des rayons focalisés
- o combinaison des deux précédentes : au moins un couloirs anti-retour (7,7A,7B) débouchant dans au moins une « cavité afocale » (6,6A,6B).

25 ***Principe général de fonctionnement***

Le dispositif (1) de type « piège solaire hyperthermique simple » comprend essentiellement :

- un socle (20) fixé sur le sol, doté d'un mécanisme l'orientant selon 2 axes de rotation distincts
 - o l'un (21A) assurant un suivi de l'angle local d'azimut du soleil,
 - o l'autre (21B), assurant un suivi de l'angle local de hauteur du soleil,

- un support (22) subissant exactement l'orientation des 2 rotations précédentes,
- au moins un miroir collecteur (5) fixé sur le support dont l'orientation permet à chaque miroir de pointer
5 précisément vers le centre apparent du soleil (S),
- une ou plusieurs enceintes de confinement de l'énergie (ECE) dans lesquelles pénètrent les rayons (4) collectés par le miroir collecteur (5), éventuellement renvoyés par un jeu de miroirs
10 complémentaires (19),

L'enceinte de confinement (ECE) est constituée :

- soit d'au moins une cavité afocale (6,6A,6B)
- soit d'au moins un couloir anti-retour (7,7A,7B)
- soit de l'association d'au moins une cavité afocale
15 et d'au moins un couloir anti-retour, et,
- d'une coque isolante obtenue grâce à des miroirs (11, 11A, 11B, 11C) sensiblement concentriques, enveloppant chaque cavité afocale (6,6A,6B) et chaque couloir anti-retour (7,7A,7B), destinés à supprimer
20 les pertes thermiques par rayonnement et conduction, grâce aux aménagements suivants :

- o leurs faces réfléchissantes, de préférence à haut pouvoir réfléchissant, sont orientées vers l'intérieur, leurs faces non-réfléchissantes, de
25 préférence à haut pouvoir absorbant, sont orientées vers l'extérieur,
- o l'espace entre ces miroirs est rempli par un ou plusieurs excellents isolants thermiques (12,12A,12B,12C).

30 Une exposition prolongée au soleil (S) pourra élever la température interne de l'enceinte (ECE) à plusieurs milliers de Kelvin ; à condition d'y aménager une trappe, celle-ci pourra alors constituer un four solaire expérimental pour des objets de petite taille, ou de plus

grande taille si l'enceinte (ECE) a une dimension adaptée à l'objet.

Le dispositif (1) de type « piège solaire hyperthermique à fluide caloporteur » reprend les éléments du « piège solaire hyperthermique simple » en lui ajoutant des tubulures d'échange thermique (27,30) au contact de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE), dans lequel circulera ledit fluide. Les pièges solaires à fluide caloporteur peuvent assurer différentes fonctions :

- 10 - four solaire de plus grande dimension et excentré de l'emplacement de la cavité anti-émissive,
- thermolyse de composés chimiques en les mettant au contact du fluide, ou bien dans une cavité plus grande (29) réchauffée par le fluide,
- 15 - récupération de chaleur ou d'un travail mécanique dans le cadre d'un cycle thermodynamique :
 - o ouvert : le fluide caloporteur est injecté à partir de l'extérieur de la machine (32), réchauffé au contact (24) de la cavité hyperthermique, puis rejeté à l'extérieur en produisant éventuellement un travail mécanique,
 - o fermé : le fluide caloporteur reste confiné dans un circuit fermé dont le parcours lui permet de se réchauffer au contact (24) de la cavité anti-émissive et se refroidir au contact (25) d'un autre échangeur thermique.

Dans ce dernier cas, une production d'énergie mécanique est possible, tout particulièrement avec un cycle de Stirling. La solution la plus élégante est :

- 30 - l'intégration dans la coque isolante du régénérateur du moteur Stirling,
- la mise en contact de la partie chaude (24) du moteur Stirling avec la cavité anti-émissive (6) ou le couloir anti-retour (7) dans la coque isolante,

- le refroidissement de la partie froide du moteur à l'extérieur de la coque (25), par tout moyen adéquat (refroidissement à l'air brassé ou non, à l'eau...)

Pour la production d'énergie électrique, il suffira de coupler l'axe du moteur Stirling à une génératrice. Le cycle de Stirling respecte théoriquement le rendement optimal de Carnot entre une source chaude et une source froide. De plus, le circuit fermé du fluide caloporteur permet de le choisir à haute conductivité thermique.

10

Dimensions et implantations

La taille des pièges solaires hyperthermiques (1) peut être très variable : toutefois, des miroirs (5) de quelques mètres carrés possèdent les dimensions adéquates pour obtenir par beau temps :

- une puissance thermique de quelques milliers de Watt
- une puissance mécanique de 300 à 600 W/m² selon le cycle thermodynamique et la qualité du moteur utilisés.
- une prise au vent de l'ordre de celle d'une parabole satellite qui ne pose pas de problème particulier.

20

Pour des installations à usage industriel, on obtient une centrale électrique solaire de haut rendement en juxtaposant les pièges solaires (1) sur toute la surface mise à disposition. Des dispositifs rehausseurs (36) montés ou non sur des socles rotatifs (37) peuvent être envisagés pour éviter les phénomènes d'ombre intervenant en incidence rasante du soleil à son lever et à son coucher. Le caractère modulaire de la centrale sera particulièrement profitable en terme de fiabilité et de maintenance, car :

30

- la probabilité de panne simultanée sur tous les pièges hyperthermiques est quasi nulle,

- une intervention sur un piège se fait en le déconnectant sans arrêter la centrale, avec une influence faible sur sa puissance dès que le nombre de pièges juxtaposés dépasse 10.

5 De telles installations trouveront particulièrement bien leur place dans des zones bien insolées et peu valorisées, représentant des milliers de km² telles que :

- les crêtes à valeur agricole très faible,
- les mers et océans,
- 10 - les déserts.

La ressource solaire étant intermittente et irrégulière, la régulation de la production électrique de telles centrales doit être prévue :

- sans stockage d'énergie : le réseau gère les irrégularités en jouant sur la production d'autres centrales électriques régulatrices (notamment thermiques ou hydrauliques), comme il le fait actuellement pour gérer l'irrégularité des centrales éoliennes,
- 15 - avec stockage d'énergie : les pièges solaires hyperthermiques présentent l'avantage de permettre un stockage thermique de grande ampleur, efficace et peu onéreux puisqu'il suffira de chauffer à environ 1000°C, à l'aide d'un fluide caloporteur et de tubulures d'échange thermique (27,30), une masse importante de matériaux de bonne capacité thermique (29) : roche, terre, sable, métaux, eau, fluide spécifique... Ces matériaux devront être positionnés dans des containers (29) reprenant les principes de fabrication de la coque isolante. Les containers pourront éventuellement être enterrés ou intégrés dans le dispositif rehausseur (36).
- 20
- 25
- 30

Dans le cadre de cette production électrique, sur la base d'un rendement de 60%, il reste 40% de l'énergie

solaire incidente rejetée sous la forme de chaleur. Deux options de cogénération sont envisageables :

- source froide peu refroidie : rejetant un fluide à environ 90°C et plus, permettant l'alimentation en appoint d'un chauffage urbain,
- source froide très refroidie : rejetant un fluide à moins de 25°C permettant de réchauffer gratuitement une serre à vocation agricole toute l'année, ce qui est actuellement impossible selon les saisons et/ou les pays.

Le potentiel solaire est très important puisque, avec un rendement de conversion thermoélectrique de 60% et 100 W/m² de puissance solaire moyenne annuelle :

- une installation semi-industrielle de 100 m² (soit 10x10m) a une puissance moyenne électrique de 6 kW adaptée à un immeuble bien insolé de 15 appartements « 3 pièces »
- une grosse installation de 900 km², en un seul carré de 30 km de côté, ou répartie en plusieurs îlots en mer produirait 54 GW, soit l'équivalent de 54 centrales nucléaires, ce qui doublerait la puissance électrique installée en France.

Ces plates-formes off-shore sont tout à fait envisageables puisqu'elles sont largement maîtrisées depuis des années dans le cadre d'extractions pétrolières et que l'électricité produite peut transiter par câble sous-marin. Par ailleurs, dans le cas d'une construction proche du continent, leur périmètre important pourrait être aménagé en quais pour désengorger les ports de plaisance.

Ainsi, le piège solaire hyperthermique (1) s'adapte aussi bien à une approche centralisée que décentralisée de la production d'énergie électrique d'origine solaire.

Pour une installation à usage domestique, un ou plusieurs pièges solaires sont implantables sur les toits

des immeubles ou des maisons. Les puissances sont alors beaucoup plus faibles, mais amplement suffisantes pour couvrir plus de la moitié des besoins électriques, voire la totalité. Sur la base de 3500 kWh annuels par foyer, cela
5 représente une puissance moyenne de 400 W, ce qui correspond à la production de 4 paraboles de 150 cm de diamètre, de rendement 60% et insolées à 100 W/m² en moyenne.

La cogénération est aussi envisageable en utilisant
10 l'air de la maison, ou son eau « chaude » comme source froide. La maison dispose dans ce cas de 2333 kWh thermiques d'appoint et de 3500 kWh électriques par année.

Enfin, quel que soit le type d'installation (industrielle, semi-industrielle ou domestique), lorsque le
15 piège hyperthermique (1) se destine à la production d'énergie électrique, la face non réfléchissante de son miroir collecteur (5) peut être tapissée de panneaux photovoltaïques (33) qui sont les seuls dispositifs capables de convertir directement un rayonnement solaire
20 indirect ou diffus en électricité. En période diurne, cette conversion du rayonnement diffus sera permanente quelles que soient les conditions atmosphériques. Toutefois, si les conditions deviennent nuageuses, et avec une cinématique d'orientation adéquate, le miroir collecteur pourra être
25 basculé de 180° environ afin de placer face aux nuages les panneaux photovoltaïques (33).

Une telle machine, combinant un haut rendement de conversion électrique du rayonnement solaire direct (grâce à son piège hyperthermique) et la récupération optimale du
30 rayonnement solaire diffus (grâce à ses panneaux photovoltaïques), se classe immédiatement parmi les machines hélioélectriques les plus efficaces et adaptatives pour des applications variées et respectueuses de l'environnement, qu'elles soient industrielles ou à plus
35 petite échelle.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront dans la description détaillée suivante. Le fil directeur de cette description est le suivi chronologique du devenir du rayonnement solaire direct et son exploitation à travers les divers éléments du dispositif (1). En conclusion, des dispositions à caractère industriel de pièges solaires seront évoquées. Il sera fait référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1A représente une portion de miroir collecteur (5) impacté en un point précis qui est le sommet du cône (3) dans lequel une famille de rayons solaires directs (4) incidents sont contenus, et en relation avec le système d'axes (O,x,y,z)

- les figures 1B,1D,1F illustrent en perspective le trajet des rayons après réflexion sur le miroir collecteur (5) selon 3 hypothèses d'incidence par rapport à Oz (pointant vers le centre du soleil): +0,3°, 0°, +0.3°,

- les figures 1C,1E,1G sont les vues de profil respectivement des figures 1B,1D,1F,

- la figure 2 illustre le principe d'isolation thermique de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE),

- les figures 3A et 3B situent le plan focal du miroir collecteur,

- les figures 4A,4B,4C illustrent les 3 formes paraboliques tridimensionnelles d'équation

$$z(x,y) = (\sqrt{x^2+y^2} - r_0)^2 / 2/p$$

respectivement obtenues avec $r_0=0$, $r_0>0$ et $r_0<0$, et résultant aussi de la révolution autour de Oz du profil (P) correspondant sur chaque figure,

- les figures 4D,4F,4H représentent en perspective le devenir des rayons solaires parallèles à Oz après leur réflexion sur le miroir collecteur (5) d'équation :

$$z(x,y) = (\sqrt{x^2+y^2} - r_0)^2 / 2/p$$

respectivement pour $r_0<0$, $r_0>0$ et $r_0=0$,

- les figures 4E,4G,4I illustrent la trace dans le plan focal des rayons incidents (4) et réfléchis dans les cas respectifs des figures 4D,4F,4H,

- les figures 5A,5C,5E illustrent les 3 formes paraboliques extrudées le long de x d'équation

$$z(y) = (\text{abs}(y) - r_0)^2 / 2/p$$

respectivement obtenues par $r_0=0$, $r_0<0$ et $r_0>0$,

- les figures 5B,5D,5F illustrent la trace dans le plan focal des rayons incidents (4) et réfléchis dans les cas respectifs des figures 5A,5C,5E,

- les figures 6A,6B,6C illustrent les 3 formes sphériques tridimensionnelles d'équation :

$$z(x,y) = R - \sqrt{R^2 - (\sqrt{x^2+y^2}-r_0)^2}$$

respectivement obtenues avec $r_0=0$, $r_0>0$ et $r_0<0$, et résultant aussi de la révolution autour de Oz du profil (P) correspondant sur chaque figure,

- les figures 6D,6F,6H représentent en perspective le devenir des rayons solaires (4) parallèles à Oz après leur réflexion sur le miroir collecteur (5) d'équation :

$$z(x,y) = R - \sqrt{R^2 - (\sqrt{x^2+y^2}-r_0)^2}$$

respectivement pour $r_0<0$, $r_0>0$ et $r_0=0$,

- les figures 6E,6G,6I illustrent la trace dans le plan focal des rayons incidents (4) et réfléchis dans les cas respectifs des figures 6D,6F,6H,

- les figures 7A,7C,7E illustrent les 3 formes paraboliques extrudées le long de x d'équation

$$z(y) = R - \sqrt{R^2 - (\text{abs}(y)-r_0)^2}$$

respectivement obtenues par $r_0=0$, $r_0<0$ et $r_0>0$,

- les figures 7B,7D,7F illustrent la trace dans le plan focal des rayons incidents (4) et réfléchis dans les cas respectifs des figures 7A,7C,7E,

- la figure 8A représente un miroir collecteur (5) de révolution en position face au soleil avec le système d'axes (O,x,y,z) s'y rapportant,

5 - la figure 8B illustre l'emplacement géométrique dans le plan focal tracé par les réflexions sur le miroir (5) de tous les rayons solaires (4) parallèles à Oz

- la figure 8C représente un miroir collecteur (5) extrudé le long de Ox en position face au soleil avec le système d'axes (O,x,y,z) s'y rapportant,

10 - la figure 8D illustre l'emplacement géométrique dans le plan focal tracé par les réflexions sur le miroir (5) de tous les rayons solaires (4) parallèles à Oz

- la figure 8E illustre, dans le plan focal d'un miroir collecteur de révolution avec $r_0=0$, l'emplacement géométrique et les dimensions de la surface traversée par
15 tous les rayons directs (4) du soleil (S), après leur réflexion sur le miroir collecteur (5),

- la figure 8F illustre, dans le plan focal d'un miroir collecteur de révolution avec $r_0 \neq 0$, l'emplacement
20 géométrique et les dimensions de la surface traversée par tous les rayons (4) du soleil (S), après leur réflexion sur le miroir collecteur (5),

- la figure 8G illustre, dans le plan focal d'un miroir collecteur (5) extrudé avec $r_0=0$, l'emplacement
25 géométrique et les dimensions de la surface traversée par tous les rayons (4) du soleil (S), après leur réflexion sur le miroir collecteur (5),

- la figure 8H illustre, dans le plan focal d'un miroir collecteur (5) extrudé avec $r_0 \neq 0$, l'emplacement
30 géométrique et les dimensions de la surface traversée par tous les rayons (4) du soleil (S), après leur réflexion sur le miroir collecteur (5),

- la figure 9A illustre le croisement (CR) après le plan focal des faisceaux réfléchis par un miroir collecteur (5) extrudé avec $r_0 > 0$

5 - la figure 9B illustre le croisement (CR) après le plan focal des faisceaux réfléchis par un miroir collecteur (5) de révolution avec $r_0 > 0$

- la figure 9C illustre le croisement (CR) avant le plan focal des faisceaux réfléchis par un miroir collecteur (5) extrudé avec $r_0 < 0$

10 - la figure 9D illustre le croisement (CR) avant le plan focal des faisceaux réfléchis par un miroir collecteur (5) de révolution avec $r_0 < 0$

- la figure 10A représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur guidage progressif et sans aucun rebroussement dans un couloir (7) courbe à section constante,

20 - la figure 10B représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur guidage progressif et sans aucun rebroussement dans un couloir (7) brisé à section constante, qui est un cas limite de la figure 10A lorsque le rayon de la paroi interne (16A) du couloir est nul,

- la figure 10C représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur rebroussement systématique dans un couloir (7) courbe à section constamment décroissante,

25 - la figure 10D représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur rebroussement systématique dans un couloir (7) brisé à section constamment décroissante, qui est un cas limite de la figure 10C lorsque le rayon de la paroi interne (16A) du couloir est nul,

30 - la figure 10E représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur progression systématique dans un couloir (7) courbe à section constamment croissante,

- la figure 10F représente pour des rayons (SP) d'incidence quelconque leur progression systématique dans un couloir (7) brisé à section constamment croissante, qui est un cas limite de la figure 10E lorsque le rayon de la paroi interne (16A) du couloir est nul,

- la figure 10G illustre dans le cas d'un couloir (7) à paroi rectiligne avec 3 cas :

- le rebroussement systématique des rayons (R) dans le couloir lorsque sa section est décroissante,

- la progression systématique des rayons (R) dans le couloir lorsque sa section est constante, avec conservation des pentes d'un rayon quelconque pour un nombre pair de réflexions,

- progression systématique des rayons (R) dans le couloir lorsque la section du couloir est croissante,

- la figure 11A présente la cavité afocale (6) anti-émissive concave/concave à double miroir parabolique concave (9,10), avec foyers F confondus et axes alignés,

- la figure 11B présente la cavité de la figure 11A équipée de miroirs de perfectionnement (17A,17B) augmentant ses qualités anti-émissives,

- la figure 11C montre le piégeage parfait d'un rayon (R) parallèle à l'axe d'une cavité afocale anti-émissive (6) de type concave/concave,

- la figure 11D illustre le piégeage parfait d'un faisceau parallèle (FP) à l'axe des deux miroirs concaves,

- les figures 11E et 11F montrent le très bon confinement de rayons (R) non parallèles à l'axe des deux miroirs concaves (9,10),

- la figure 11G représente le confinement d'une source ponctuelle (SP) injectée dans un couloir (7)

divergent anti-émissif débouchant sur une cavité afocale (6) concave/concave,

- la figure 11H présente la cavité afocale anti-émisive (6) concave/convexe à double miroir parabolique, l'un concave (9), l'autre convexe (10), avec foyers confondus et axes alignés,

- la figures 11I montre le piégeage parfait d'un rayon (R) parallèle à l'axe d'une cavité afocale (6) anti-émisive de type concave/convexe,

- les figures 11J et 11K montrent le très bon confinement de rayons (R) non parallèles à l'axe des deux miroirs concave/convexe (9/10),

- la figure 11L illustre le piégeage parfait d'un faisceau (FP) parallèle à l'axe des deux miroirs concave/convexe (9/10),

- la figure 11M représente le confinement d'une source ponctuelle (SP) injectée via un miroir de renvoi (19) dans un couloir (7) divergent anti-émissif débouchant sur une cavité afocale (6) concave/convexe,

- les figures 11N et 11O présentent une variante de la cavité afocale (6) anti-émisive concave/concave avec désalignement des axes des deux miroirs paraboliques (9,10) ;

- les figures 11P et 11Q illustrent le confinement avec un géométrie afocale imparfaite,

- la figure 12A montre en perspective éclatée un dispositif (1) conforme à l'invention,

- les figures 12B et 12C présentent la focalisation et l'injection du rayonnement solaire dans la cavité,

- la figure 12D montre en perspective un dispositif (1) conforme à l'invention en situation de piégeage solaire hyperthermique,

- la figure 13A illustre un dispositif (1) conforme à l'invention à fluide caloporteur conduit par des tubulures (27) apportant la chaleur recueillie dans un dispositif de stockage thermique externe (29),

5 - la figure 13B illustre un dispositif (1) conforme à l'invention à fluide caloporteur actionnant une machine thermodynamique (32) implantée au voisinage de la cavité afocale anti-émissive (6),

10 - la figure 14A présente un dispositif (1) conforme à l'invention plus particulièrement adapté à la fonction de four solaire,

- la figure 14B illustre un dispositif (1) conforme à l'invention équipé de panneaux photovoltaïques (33) sur la partie non réfléchissante de son miroir collecteur (5),

15 - les figures 15A,15B,15C et 15D présentent des implantations de dispositifs (1) conformes à l'invention dans le cadre de centrales électriques héliothermodynamiques.

Description détaillée

Le rayonnement solaire direct est issu du Soleil (S), notre étoile, dont le centre S est situé à 150 000 000 de
 5 kilomètres du centre de la Terre T. Le diamètre du soleil vaut environ 1 350 000 km. Il est donc vu depuis la Terre sous le diamètre angulaire $DA = 0.52^\circ$. Ainsi, tel qu'illustré en figure 1A, tout point M d'une surface exposée au soleil est susceptible d'être impacté par des
 10 rayons situés dans un cône (3) de sommet M, d'angle au sommet 0.52° , et d'axe de révolution MS. En pratique, compte tenu des turbulences atmosphériques, il est judicieux de retenir un diamètre angulaire de 0.6° .

Le Soleil est une centrale de fusion thermonucléaire
 15 naturelle et écologique sans laquelle la vie sur Terre telle qu'on la connaît serait absente. Bien qu'il soit une étoile de taille modeste, il dégage d'énormes quantités d'énergie, se dispersant dans l'espace principalement sous forme de rayonnement (4). La Terre n'en intercepte qu'une
 20 infime partie, sur la moitié de sa surface en moyenne, et pourtant, le captage de cette infime partie fournirait 10000 fois les besoins énergétiques humains actuels.

Les rayons solaires sont au départ des ondes sphériques issues des points émissifs du Soleil. Toutefois,
 25 150 000 000 de kilomètres plus loin, et à l'échelle des quelques mètres du piège hyperthermique (1), ces ondes (4) sont perçues comme quasi-planes. On appelle O le centre de la surface collectrice (5) de ces ondes. Ainsi, le rayonnement (4) à collecter est assimilé à une assemblée
 30 d'ondes planes dont les directions font un angle de $\pm 0.3^\circ$ avec l'axe OS.

Tel qu'illustré sur les figures 1B à 1F, un miroir collecteur (5) concave est placé face au Soleil (S) afin de collecter ces ondes planes (4) d'inclinaison comprise entre
 35 -0.3 et $+0.3^\circ$.

Tel qu'illustré aux figures 3A et 3B, ces ondes planes (4) se réfléchissent sur le miroir collecteur (5) concave et focalisent dans un plan, orthogonal à OS, appelé plan focal image (13). La figure 3B illustre plus particulièrement une focalisation ponctuelle, mais cette géométrie dépend du miroir collecteur (5) choisi.

De manière générale, on appellera

- foyers images principaux : les zones de focalisation des rayons (4) arrivant parallèlement à OS ou Oz (angle 0°),
- foyers images secondaires : les zones de focalisation des rayons (4) inclinés par rapport à OS. (angles non nuls et quelconques compris entre -0.3° et $+0.3^\circ$)

Ces foyers principaux et secondaires sont proches et définissent le plan focal image (13). La distance entre ce plan et O est bien particulière et dépend de la géométrie du miroir collecteur (5).

Sur ce plan focal image (13), on place une ou plusieurs entrées (8) d'une ou plusieurs enceintes de confinement de l'énergie (ECE) de manière à ce que tous les rayons focalisés y pénètrent. Les formes de ces enceintes peuvent être diverses, mais choisies pour leurs propriétés de confinement des rayons. Tel qu'illustré à la figure 2, ces enceintes (ECE) doivent être isolées de l'extérieur par une succession d'enveloppes réfléchissantes (11A,11B,11C) sur leur face interne, absorbantes sur leur face externe, et concentriques. On dispose entre ces enveloppes un puissant isolant thermique (12A,12B,12C), par exemple un vide poussé d'argon. Compte tenu de l'étroitesse de l'entrée (8) de la cavité, les pertes par conduction et rayonnement thermique sont ainsi très faibles, voire négligeables. Un clapet (26) obturant l'entrée de la cavité émissive vient parfaire l'isolation lorsque les conditions d'ensoleillement sont insuffisantes.

Tel qu'illustré aux figures 4A,4B et 4C, il existe selon le paramètre de rayon r_0 , 3 familles de profils (P) paraboliques de révolution : $r_0=0$ en figure 4A, $r_0>0$ en figure 4B, $r_0<0$ en figure 4C.

- 5 La surface engendrée par la révolution autour de l'axe Oz des courbes d'équation :

$$z(y) = (\text{abs}(y) - r_0)^2 / 2/p \text{ dans le plan } (O,y,z)$$

donne la forme tridimensionnelle des miroirs de la famille « parabolique de révolution (PR) ».

- 10 Tel qu'illustré aux figures 4D et 4E pour un miroir PR avec $r_0<0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans une zone circulaire (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 4E présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et
15 réfléchis (14). On obtient un cercle de rayon $-r_0$ constituant le foyer image principal (14).

- Tel qu'illustré aux figures 4F et 4G pour un miroir PR avec $r_0>0$, les rayons parallèles à Oz focalisent dans une zone circulaire (14) contenue dans le plan focal image
20 (13). La figure 4G présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient un cercle de rayon r_0 constituant le foyer image principal (14).

- Tel qu'illustré aux figures 4H et 4I pour un miroir PR
25 avec $r_0=0$, les rayons parallèles (4) à Oz focalisent dans une zone ponctuelle (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 4I présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient un point constituant le foyer
30 image principal (14).

Pour tous les miroirs PR, les foyers principaux (14) images sont très bien délimités car il y a stigmatisme rigoureux dans cette configuration optique.

Tel qu'illustré aux figures 5A,5C et 5E, on peut aussi engendrer une surface par translation le long de Ox des courbes d'équation :

$$z(y) = (\text{abs}(y) - r_0)^2 / 2/p \text{ dans le plan } (O,y,z)$$

5 Ce qui donne la forme tridimensionnelle des miroirs de la famille « parabolique extrudé (PE) ».

Tel qu'illustré aux figures 5A et 5B pour un miroir PE avec $r_0=0$, les rayons parallèles (4) à Oz focalisent dans une zone rectiligne (14) contenue dans le plan focal image
10 (13). La figure 5B présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient une droite d'équation :

$$(y=0, z=p/2) \text{ constituant le foyer image principal (14).}$$

Tel qu'illustré aux figures 5C et 5D pour un miroir PE
15 avec $r_0 < 0$, les rayons parallèles (4) à Oz focalisent dans une zone rectiligne (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 5D présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient deux droites d'équation ($y=\pm r_0, z=p/2$)
20 constituant le foyer image principal (14A,14B).

Tel qu'illustré aux figures 5E et 5F pour un miroir PE avec $r_0 > 0$, les rayons parallèles (4) à Oz focalisent dans une zone rectiligne (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 5F présente plus particulièrement la trace
25 dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient deux droites d'équation ($y=\pm r_0, z=p/2$) étant le foyer image principal (14A,14B).

Pour tous les miroir PE, les foyers images principaux sont très bien délimités car il y a stigmatisme rigoureux
30 dans cette configuration optique.

Tel qu'illustré aux figures 6A,6B et 6C, il existe selon le paramètre de rayon r_0 , 3 familles de profils (P) sphériques de révolution : $r_0=0$ en figure 6A, $r_0 > 0$ en
35 figure 6B, $r_0 < 0$ en figure 6C.

La surface engendrée par la révolution autour de l'axe Oz des courbes d'équation :

$z(y) = R - \sqrt{R^2 - (\text{abs}(y)-r_0)^2}$ dans le plan (O,y,z) donne la forme tridimensionnelle des miroirs (5) de la famille « sphérique de révolution (SR) ».

Tel qu'illustré aux figures 6D et 6E pour un miroir SR avec $r_0 < 0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans une zone sensiblement circulaire (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 6E présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons (4) incidents et réfléchis (14). On obtient un nuage de points répartis autour d'un cercle de rayon $-r_0$ constituant le foyer image principal (14).

Tel qu'illustré aux figures 6F et 6G pour un miroir SR avec $r_0 > 0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans une zone circulaire (14) contenue dans le plan focal image (13). La figure 6G présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient un nuage de points répartis autour d'un cercle de rayon r_0 constituant le foyer image principal (14).

Tel qu'illustré aux figures 6H et 6I pour un miroir SR avec $r_0 = 0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans une zone (14) sensiblement ponctuelle contenue dans le plan focal image (13). La figure 6I présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient un nuage de points constituant le foyer image principal (14).

Par rapport à la famille PR, les foyers images principaux des miroirs SR sont moins bien délimités car il y a stigmatisme approché seulement. Pour les foyers secondaires des miroirs PR, le stigmatisme demeure approché, mais de meilleure qualité que pour les miroir SR.

Tel qu'illustré aux figures 7A,7C et 7E, on peut aussi engendrer une surface par translation le long de Ox des courbes d'équation :

$$z(y) = R - \sqrt{R^2 - (\text{abs}(y)-r_0)^2} \text{ dans le plan } (O,y,z)$$

5 Ce qui donne la forme tridimensionnelle des miroirs (5) de la famille « sphérique extrudé (SE) ».

Tel qu'illustré aux figures 7A et 7B pour un miroir SE avec $r_0=0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans une zone rectiligne (14) contenue dans le plan focal image
10 (13). La figure 7B présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des rayons incidents (4) et réfléchis (14). On obtient un nuage de points répartis autour d'une droite (14) d'équation $(y=0,z=R/2)$ constituant le foyer image principal (14).

15 Tel qu'illustré aux figures 7C et 7D pour un miroir SE avec $r_0<0$, les rayons (4) parallèles à Oz focalisent dans deux zones rectilignes (14A,14B) contenue dans le plan focal image (13). La figure 7D présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image des
20 rayons (4) incidents et réfléchis (14). On obtient deux nuages de points répartis autour des droites d'équation $(y=\pm r_0,z=R/2)$ constituant le foyer image principal (14A,14B).

Tel qu'illustré en figure 7E et 7F pour un miroir SE
25 avec $r_0>0$, les rayons parallèles (4) à Oz focalisent dans une zone rectiligne (14A,14B) contenue dans le plan focal image (13). La figure 7F présente plus particulièrement la trace dans le plan focal image (13) des rayons incidents (4) et réfléchis (14A,14B). On obtient deux nuages de
30 points répartis autour des droites d'équation $(y=\pm r_0,z=R/2)$ constituant le foyer image principal (14A,14B).

Par rapport à la famille PE, les foyers images principaux des miroirs SE sont moins bien délimités car il y a stigmatisme approché seulement dans cette configuration
35 optique.

Cela se généralise pour tout miroir extrudé non rigoureusement parabolique, et a fortiori pour les foyers images secondaires (formés par la focalisation des rayons incidents inclinés par rapport à Oz) : dans ces conditions optiques, le stigmatisme n'est qu'approché, même pour la famille PE.

Les figures 8A,8B,8C,8D résument l'emplacement et les dimensions des foyers images principaux (14) des différents miroirs (5) en fonction du paramètre de rayon r_0 et de la distance entre O et le plan focal (13), qui vaut $p/2$ dans le cas des familles paraboliques, et $R/2$ dans le cas des familles sphériques.

Tel qu'illustré aux figures 8E,8F,8G,8G et 8H, les rayons focalisés traversent des surfaces focales (8) constituées par la juxtaposition de tous les foyers images principaux et secondaires. Tous ces foyers sont situés dans le plan $z=p/2$ dans le cas des miroirs paraboliques et $z=R/2$ dans le cas des miroirs sphériques. Ils délimitent dans le plan focal des surfaces focales, identiques aux surfaces d'entrée (8) des rayons des enceintes de confinement de l'énergie (ECE), plus précisément :

- fig 8E : $r_0=0$, cas du miroir parabolique ou sphérique de révolution à foyer principal ponctuel (PRFPP ou SRFPP). Dans ce cas :
 - o la surface est un disque dont les coordonnées du centre sont $(x=0,y=0,z=p/2)$
 - o le diamètre du disque est :
 - $p/2 \tan DA$ pour un miroir PRFPP
 - $R/2 \tan DA$ pour un miroir SRFPP
- fig 8F : $r_0 \neq 0$, cas du miroir parabolique ou sphérique de révolution à foyer principal circulaire (PRFPC ou SRFPC). Dans ce cas :
 - o la surface est un anneau dont les coordonnées du centre sont $(x=0,y=0,z= p/2 \text{ ou } R/2)$

- o le rayon moyen de l'anneau est $\text{abs}(r_0)$:
- o la largeur de l'anneau est
 - $p/2 \tan DA$ pour un miroir PRFPC
 - $R/2 \tan DA$ pour un miroir SRFPC
- 5 - fig 8G : $r_0=0$, cas du miroir parabolique ou sphérique extrudé à foyer principal rectiligne (PEFPR ou SEFPR). Dans ce cas :
 - o la surface est une bande rectiligne dont la ligne centrale a pour équation ($y=0, z= p/2$ ou $R/2$)
 - 10 o le largeur de la bande est :
 - $p/2 \tan DA$ pour un miroir PEFPR
 - $R/2 \tan DA$ pour un miroir SEFPR
- fig 8H : $r_0 \neq 0$, cas du miroir parabolique ou sphérique extrudé à foyer principal birectiligne (PEFPBr ou SEFPBr). Dans ce cas :
 - 15 o la surface est constituée de 2 bandes parallèles
 - o les lignes centrales de chaque bande ont pour équation ($y= +/- \text{abs}(r_0)$, $z= p/2$ ou $R/2$)
 - o la largeur de chaque bande vaut :
 - 20 ▪ $p/2 \tan DA$ pour un miroir PEFPBr
 - $R/2 \tan DA$ pour un miroir SEFPBr

Tel qu'illustré aux figures 9A,9B,9C et 9D, la réflexion des rayons (4) sur des miroirs (5) de paramètre $r_0 \neq 0$ engendre un croisement (CR) des faisceaux :

- 25 - après le plan focal si $r_0 > 0$ (fig. 9A pour un miroir (5) extrudé, 9B pour un miroir de révolution),
- avant le plan focal si $r_0 < 0$ (fig. 9C pour un miroir (5) extrudé, 9D pour un miroir de révolution).

Les conditions de stigmatisme approché sont meilleures dans
30 le cas où $r_0 > 0$.

Les figures 10A à 10G montrent les différents types de couloir de guidage anti-retour, également anti-émissif (7) pour le confinement de rayons lumineux.

La figure 10A montre un couloir (7) courbe et à section constante, ce qui permet la canalisation des rayons (SP) quelle que soit leur incidence initiale dans le couloir (7).

5 La figure 10B montre un couloir (7) anguleux sur sa paroi de rayon le plus faible (16A). La section est constante, ce qui permet, là-aussi, la canalisation des rayons (SP) quelle que soit leur incidence initiale dans le couloir (7).

10 La figure 10C montre un couloir (7) courbe et à section décroissante dans le sens de parcours des rayons (SP) injectés : ceci ralentit leur progression jusqu'à provoquer leur retour systématique, quelle que soit leur incidence initiale dans le couloir (7).

15 La figure 10D montre un couloir (7) anguleux sur sa paroi (16A) de rayon le plus faible, et à section décroissante dans le sens de parcours des rayons (SP) injectés : ceci ralentit leur progression jusqu'à provoquer leur retour systématique, quelle que soit leur incidence
20 initiale dans le couloir (7).

Ces phénomènes de retour systématique sont capables de confiner efficacement le rayonnement infrarouge émis par la cavité chauffée à plusieurs milliers de Kelvin.

25 La figure 10E montre un couloir (7) courbe et à section croissante dans le sens de parcours des rayons (SP), ce qui permet leur progression sans aucun phénomène de retour et quelle que soit leur incidence initiale dans le couloir.

30 La figures 10F montre un couloir (7) anguleux sur sa paroi de rayon le plus faible (16A). La section est croissante dans le sens de parcours des rayons (SP), ce qui permet leur progression sans aucun phénomène de retour et quelle que soit leur incidence initiale dans le couloir.

Ces phénomènes anti-retour sont capables de conduire très efficacement vers la cavité le rayonnement solaire direct focalisé par le miroir collecteur.

La figure 10G présente le comportement d'un couloir (7) rectiligne de section décroissante, constante et croissante dans le sens de parcours des rayons (R) injectés.

L'utilisation des parois (16A,16B) tel que le couloir (7) ait une section croissante permet à la fois :

- 10 - la canalisation systématique des rayons solaires (4) vers l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE) où ils vont se convertir en chaleur, portant sa température à plus de 1500 K,
- 15 - le reflux du rayonnement infrarouge émis par la cavité (6) et le couloir anti-retour (7), et ainsi son confinement dans l'enceinte (ECE).

Les figures 11A à 11O illustrent les principes géométriques utilisés par les cavités anti-émisives (6). Le rôle de ces cavités (6) est d'imposer aux rayons (R) collectés des dizaines, voire des centaines de réflexions sur leur paroi (9,10), chacune de ces réflexions étant partiellement absorbante. Ainsi, l'énergie lumineuse est progressivement convertie en chaleur. Les parois (9,10) se mettent alors à produire un rayonnement proche de celui d'un corps noir, qu'il faut à son tour confiner.

Ainsi, la géométrie anti-émisive de la cavité (6) doit être capable de confiner à la fois les rayons injectés et le rayonnement thermique résultant de l'échauffement des parois (9,10).

Pour cela, tel qu'illustré aux figures 11A et 11H, la présente invention préconise l'utilisation :

- de deux miroirs paraboliques (9,10) de distance focale différente,

- de confondre les foyers F de ces 2 miroirs de manière à créer une cavité afocale (6) dont les deux variantes sont :

- o cavité biconcave (présentée à la figure 11A)
- 5 o cavité convexe/concave (figure 11H),

- de préférence, d'aligner les axes optiques des 2 miroirs (9,10) ainsi positionnés.

Tel qu'illustré à la figure 11B pour une cavité (6) biconcave, des petits miroirs (17A,17B) optimisant le confinement ou simplifiant la construction de la cavité 10 peuvent parfaire cette géométrie afocale anti-émissive.

Tel qu'illustré aux figures 11C et 11I, tout rayon (R) incident et parallèle aux axes alignés des miroirs paraboliques (9,10) à foyers confondus se voit alors 15 imposer un trajet géométrique infini, et donc un nombre de réflexions infini. C'est le caractère afocal de la cavité (6) qui permet ce phénomène fondamental pour la présente invention.

Tel qu'illustré aux figures 11D et 11L, un faisceau 20 parallèle (FP) est piégé sur l'axe des miroirs paraboliques, comme s'il était géométriquement attracteur.

Il s'agit là d'un piégeage progressif et irrémédiable obtenu par réflexions successives sur les parois des miroirs. Ce phénomène ne fonctionne que si les distances 25 focales des deux miroirs sont différentes, le premier impact devant se faire préférentiellement sur le miroir de plus grande distance focale (9).

Tel qu'illustré aux figures 11E et 11F pour les géométries biconcaves, et 11J et 11K pour les géométries de 30 type concave/convexe, le piégeage reste de très bonne qualité pour des rayons (R) légèrement inclinés par rapport à l'axe des miroirs, imposant des dizaines de réflexions avant d'offrir une possibilité géométrique de sortie de la cavité (6). L'enveloppe des rayons dans le cas de la cavité

biconcave est sensiblement parabolique et l'orientation de cette courbe caustique parabolique s'inverse au moment où l'incidence est parallèle à l'axe des miroirs (9,10).

Tel qu'illustré aux figures 11F et 11M, la combinaison
 5 d'un couloir (7) à section croissante (dans le sens d'injection des rayons) et d'une cavité afocale (6) rend parfait le confinement géométrique des rayons (R) quelle que soit l'incidence initiale de ceux-ci à l'entrée de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE), constituée
 10 par le couloir (7), la cavité afocale (6) et les miroirs isolantes (11A,11B,11C) ainsi que les isolants thermiques (12A,12B,12C).

Les figures 11N à 11Q illustrent la robustesse du confinement même dans le cas d'une cavité (6) à la
 15 géométrie imparfaite :

- dans le cas d'un désalignement des axes des 2 miroirs (9,10) pour les figures 11N et 11O,
- dans le cas d'un désalignement et de foyers F non confondus pour les figures 11P et 11Q.

20 Le caractère confondu des foyers F demeure important pour garantir le caractère afocal et donc le confinement. Néanmoins, une tolérance de l'ordre du vingtième de la distance focale ne compromet pas significativement la qualité du confinement.

25 Les figures 12A à 12D illustrent un dispositif (1), formant dans l'application illustrée un piège hyperthermique du rayonnement solaire direct à fluide caloporteur. Son but est de produire de l'énergie électrique. Tel qu'illustré à la figure 12A en vue éclatée et schématique, et 12D, en vue assemblée et schématique,
 30 le piège (1) s'articule autour :

- de 2 organes optiques impactés successivement par les rayons solaires : le miroir (5) sensiblement parabolique et l'enceinte de confinement de l'énergie

(ECE) dont l'entrée (8) est placée exactement au foyer (13) du miroir (5),

- de 3 dispositifs de conversion successifs :
 - o les parois (9,10) de la cavité anti-émissive et/ou les paroi (16A,16B) du couloir anti-retour,
 - o une machine thermodynamique (32), équipée de ses échangeurs thermiques (24,25), et,
 - o une génératrice électrique (non représentée),
- 10 - de 2 organes de réglages (non représentés) :
 - o un système de suivi et d'orientation de la parabole face au soleil, et,
 - o un système de modulation de la puissance de la machine thermodynamique,

15 Tel qu'illustré aux figures 12B et 12C, le miroir (5), selon sa géométrie, focalise les ondes quasi-planes (4) émises par le soleil (S) en une source (14) quasi-ponctuelle ou annulaire dans le plan focal du miroir (5). Le rendement de réflexion est de 90% avec de l'aluminium poli.

20 L'enceinte de confinement de l'énergie (ECE) recueille ces rayons avec un rendement dépendant de la température, allant de presque 100 % à basse température jusqu'à 0 % lorsque la puissance perdue par la cavité vaut la puissance solaire collectée.

30 Les parois (9,10,16A,16B) de l'enceinte (ECE) imposent, aussi bien aux rayons captés que ré-émis par le rayonnement thermique, des dizaines de réflexions absorbantes avant d'avoir la possibilité géométrique de sortir. Typiquement, ces parois peuvent être réalisées en acier ou en matériaux réfractaires lisses.

Tel qu'illustré à la figure 13B, la machine thermodynamique (32) peut être montée au contact de la cavité (6) pour en extraire la chaleur afin de produire du

travail mécanique avec la source froide constituée par l'atmosphère ou le sol extérieur, selon un cycle moteur thermodynamique de Brayton-Joule, vapeur, Stirling..

Comme l'illustre la figure 13A, la machine thermodynamique (32) peut aussi être montée sur le sol (20) à condition de lui amener la chaleur recueillie dans l'enceinte (ECE) par un fluide circulant dans des tuyaux (27) calorifugés avec grand soin. Le rendement de cette machine thermodynamique est le produit d'un rendement mécanique, supposé de 90%, et d'un rendement thermodynamique. Ce rendement thermodynamique dépend lui-même d'un produit :

- le rendement théorique de Carnot : 75% en supposant 1200 K pour la source chaude et 300 K pour la source froide.
- un coefficient d'irréversibilité supposé de 0.85 modélisant les pertes et imperfections de réalisation du cycle thermodynamique.

La machine thermodynamique (32), a dans ces hypothèses, 57.37% de rendement.

La génératrice électrique est couplée à un organe mécanique de la machine thermodynamique porteur de la puissance mécanique et la convertit en puissance électrique avec un rendement de 95% pour les génératrices de très bonne qualité.

Des simulations numériques montrent que le rendement de la cavité anti-émissive se maintient à plus de 90% à 1200 Kelvin. Le rendement global « solaire direct à électrique » du dispositif 1 est ainsi égal à :

$$0.9 \quad \times \quad 0.9 \quad \times \quad 0.5737 \quad \times \quad 0.95 \quad = \quad 44\%$$

réflexion cavité machine génératrice
miroir anti-émissive thermo électrique

Ce rendement est 4 fois supérieur au photovoltaïque et meilleur que celui des dispositifs actuels à concentration solaire parabolique ou cylindro-parabolique.

En effet, les réalisations actuelles (Dish Stirling ou
 5 tour solaire multi-miroirs) fonctionnent à environ 700 K, et perdent un minimum de 20 % de l'énergie collectée, à cause de la réflexion sur leur absorbeur et de leur rayonnement thermique, ce qui leur donne dans les mêmes conditions un rendement nettement inférieur :

10

0.9	x 0.8	x 0.4371	x 0.95	= 30%
réflexion	absorbeur	machine	génératrice	
miroir	réflexif et	thermo	électrique	
	rayonnant			

15

Le gain du piège hyperthermique (1) représente la moitié de la performance des technologies actuelles de concentration solaire.

Avec des améliorations sur le miroir (95% de réflexion
 20 avec de l'aluminium soigneusement poli ou des alliages argentés), sur les matériaux supportant 2000 K (céramiques, matériaux réfractaires...), et sur la mécanique (95% avec des mouvements guidés par roulements soignés) et la thermodynamique (irréversibilités 90%), le rendement
 25 deviendra :

0.95	x 0.9	x 0.7267	x 0.95	= 59%
réflexion	cavité	machine	génératrice	
miroir	anti-émissive	thermo	électrique	

30

Ce rendement deux fois meilleur que celui de « l'art
 actuel » est réalisé principalement grâce à la hausse de la
 température chaude (optimisant le rendement
 thermodynamique) et la quasi-suppression du rayonnement et
 35 de la conduction thermique de l'absorbeur (qui à ces

températures perdrait plus d'énergie qu'il n'en capterait).

Aussi, ce rendement est inaccessible aux systèmes de concentration actuels, même optimisés.

Les organes de réglage sont de deux types :

- 5 - un système de suivi solaire : le pointé du centre apparent du soleil doit être précis à $0,2^\circ$ près. Les technologies sont déjà disponibles dans le cadre de suivi d'étoiles par télescope pour en étudier le rayonnement ou en prendre des clichés. Le principe
- 10 retenu est généralement un capteur photovoltaïque 4 quadrants dont les différences de tension sont converties en commande pour 2 moteurs électriques. La précision annoncée est inférieure ou égale à 0.1° ,
- 15 - un système de modulation de la puissance de la machine thermodynamique : qui peut se faire, selon les technologies, par la limitation du débit de fluide caloporteur, par le stockage thermique avec ce même fluide dans un accumulateur de chaleur, ou par
- 20 modification de la pression du fluide dans les applications à circuit fermé (Stirling). Ces technologies sont actuellement largement maîtrisées.

L'enceinte de confinement de l'énergie (ECE) est la pierre angulaire du piège solaire hyperthermique : sa structure isolante (11A,11B,11C,12A,12B,12C) et la

25 géométrie spéciale de ses parois (9,10,16A,16B) assurent ensemble une température chaude de plusieurs milliers de Kelvin grâce à la quasi-suppression des fuites par conduction et rayonnement thermique et une quasi impossibilité géométrique de sortie pour les rayons

30 collectés par le miroir (5).

Tel qu'illustré aux figures 14A et 14B, le piège solaire hyperthermique (1) est un concept flexible et adaptable à de nombreux usages :

- fig. 14A : four solaire de bonnes dimensions,

- fig. 14B : panneaux photovoltaïques (33) sur l'envers du miroir (5) avec cinématique basculante (21B) montée sur pivot (21A) et roulettes (35A,35B,35C,35D) pour capter le rayonnement diffus, même en conditions nuageuses.

La figure (14A) présente un piège solaire hyperthermique (1) à deux cavités afocales (6A,6B) placées à l'arrière du miroir collecteur (5) et dotées chacune d'un couloir anti-retour (7A,7B). Les rayons solaires (4) convergent vers un miroir de renvoi (17) placé sensiblement au foyer image principal (14) du miroir (5). Ce miroir (17) guide les rayons vers le centre du miroir (5) qui est percé de manière à constituer l'entrée (8) de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE). L'entrée est équipée optionnellement d'un vitrage (38) dont la courbure permet de redresser légèrement les rayons. Ceux-ci vont alors se réfléchir sur les miroirs de renvoi (17A,17B) pour ensuite traverser les couloirs anti-retour (7A,7B) avant d'effectuer des dizaines de réflexions absorbantes dans la cavité afocale (6A) ou (6B). Lorsque la température des cavités est suffisamment chaude, ou bien que le flux solaire est insuffisant, un clapet (26) ferme complètement l'enceinte (ECE). Des objets ou fluides peuvent y être introduits par une trappe ou des tubulures non représentées.

Enfin, tel qu'illustré aux figures 15A,15B,15C et 15D, le piège solaire hyperthermique (1) est facilement implantable dans des installations industrielles. La juxtaposition de centaines de pièges à miroir parabolique ou extrudé est possible (fig. 15D). Que le soleil soit au lever, au coucher (fig. 15C) ou au zénith (fig. 15B), l'utilisation de rehausseur (36) permet de capter en permanence une surface solaire maximale. Plusieurs constructions sont possibles, notamment un « bâtiment escalier » (fig. 15A) monté sur un socle rotatif (37). Le

bâtiment pourrait accueillir tous les corps de stockage thermique ou des turbines à vapeur. Les possibilités sont très variées et technologiquement accessibles.

Nomenclature (1/2)

- 5
- (1) : dispositif « piège hyperthermique du rayonnement solaire direct »
- (2) : petit élément de miroir centré en M
- (3) : cône d'impact en M des rayons solaires directs
- 10 (4) : faisceau de rayons parallèles
(4A,4B,4C): rayon individuel
- (5) : miroir collecteur, de centre O
- (x)(y) : axes Ox, Oy,
- (z) : axe Oz pointant vers le soleil
- 15 (S) : soleil
- (ECE) : enceinte de confinement de l'énergie
- (6,6A,6B) : cavité anti-émissive
- (7,7A,7B) : couloir de guidage anti-retour
- (8) : entrée des rayons focalisés
- 20 (AO) : angle d'ouverture des rayons focalisés
- (9,9A,9B) : paroi absorbante et réfléchissante à longue focale
- (10,10A,10B): paroi absorbante et réfléchissante à courte focale
- (11A) : première enceinte à confinement du rayonnement thermique
- 25 (11B) : seconde enceinte à confinement du rayonnement thermique
- (11C) : troisième enceinte à confinement du rayonnement thermique
- 30 (12A) : première couche d'isolant thermique
- (12B) : seconde couche d'isolant thermique
- (12C) : troisième couche d'isolant thermique
- (13) : plan focal image du miroir collecteur
- (P) : courbe profil de miroir
- 35 (14) : foyer image principal ponctuel ou circulaire
- (14A,14B) : foyer image principal bi-rectiligne

(15A) : entrée de l'enceinte anti-émissive pour miroir de révolution à foyer image principal ponctuel

(15B) : entrée de l'enceinte anti-émissive pour miroir de révolution à foyer image principal circulaire

5

Nomenclature (2/2)

(15C) : entrée de l'enceinte anti-émissive pour miroir extrudé à foyer image principal rectiligne

10 (15D,15E) : entrées de l'enceinte anti-émissive pour miroir extrudé à foyer image principal birectiligne

(CR) : zone de croisement des rayons réfléchis par le miroir collecteur

(16A,16B) : paroi de couloir anti-retour

(SP) : source ponctuelle de rayons lumineux

15 (R) : rayon lumineux

(17,17A,17B) : miroir de perfectionnement

(FP) : faisceau concentré de rayons parallèles

(18) : miroir de fermeture

(19) : miroir de renvoi

20 (20) : socle

(21A) : axe de rotation vertical

(21B) : axe de rotation horizontal

(22) : support du miroir collecteur

25 (23A,B,C,D) : barres porteuses de l'enceinte de confinement de l'énergie

(24) : contact chaud de la machine thermodynamique

(25) : contact froid de la machine thermodynamique

(26) : clapet de fermeture de ECE

30 (27) : tubulure de prélèvement de chaleur par circulation d'un fluide

(28) : échangeur thermique

(29) : corps de stockage thermique

(30) : tubulure de retour du fluide

(31A,31B) : enceintes d'isolation thermique

35 (32) : machine thermodynamique

(33) : panneaux photovoltaïques

(34) : support pivotant

(35A,B,C,D): roulettes

(36) : rehausseur

(37) : socle rotatif

(38) : vitrage de redressement des rayons

5

Revendications

NON DISPONIBLES POUR DES RAISONS DE PROPRIETE
INTELLECTUELLE

10 Merci de votre compréhension.

Piège hyperthermique du rayonnement solaire direct

ABRÉGÉ

Dispositif (1) destiné à convertir le rayonnement solaire en chaleur à plusieurs milliers de Kelvin, fonctionnant avec tout rayonnement (4) d'ondes planes et comprenant : un socle (20), sur lequel se greffent un mécanisme orientant un support (22) selon 2 axes de rotation distincts, au moins un miroir collecteur (5) de formes sensiblement paraboliques et pointant vers le centre apparent du soleil (S), une ou plusieurs enceintes de confinement de l'énergie (ECE) dans lesquelles pénètrent les rayons (4) collectés par le miroir (5), de manière à convertir l'énergie solaire sous forme mécanique, électrique, ou thermochimique, dans des installations domestiques ou industrielles.