

Le solaire thermique concentré

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1.1 La ressource solaire | 6 |
| 1.1.1 Bilan radiatif de la Terre | 6 |
| 1.1.2 La part du solaire dans la production et la consommation d'énergie . . . | 7 |
| 1.2 Les techniques pour le solaire thermique à concentration | 11 |
| 1.2.1 Le solaire thermique concentré | 11 |
| 1.2.2 Les technologies actuelles | 13 |
| 1.3 Conclusion | 18 |

Depuis près de 4 milliards d'années, le Soleil éclaire la Terre et sa lumière transporte avec elle une énergie gigantesque. L'exploitation de cette énergie n'est que très récente dans l'histoire de l'humanité, et les technologies qui permettent de l'extraire ne sont développées que depuis quelques décennies. Aujourd'hui, le contexte économique et la prise de conscience de l'empreinte écologique de l'humanité conduisent les acteurs académiques et industriels à développer de nouvelles technologies pour capter cette énergie de la manière la plus efficace possible.

Parmi ces technologies, le solaire concentré thermodynamique permet, via la concentration du rayonnement solaire, de capter son énergie pour chauffer un matériau, cette chaleur étant alors transformée en électricité à travers un cycle thermodynamique classique similaire à celui utilisé dans les centrales thermiques.

A travers sa direction *Énergies Nouvelles*, regroupant l'étude et l'industrialisation des technologies permettant la production d'énergie en utilisant des sources non fossiles, la société Total souhaite aujourd'hui utiliser l'énergie solaire pour diversifier son offre énergétique. Grâce à différents projets concernant les technologies solaires à concentration allant de l'étude théorique d'une centrale solaire à la réalisation expérimentale d'un récepteur solaire fonctionnant à haute température, Total cherche à améliorer le rendement des centrales solaires. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse.

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première partie la ressource solaire, qui correspond à l'énergie disponible au niveau du sol. Puis nous détaillons les différentes technologies existantes dans le domaine du solaires concentré (CSP).

1.1 La ressource solaire

1.1.1 Bilan radiatif de la Terre

Le bilan radiatif de la Terre permet d'estimer la ressource en énergie provenant du Soleil et disponible pour être utilisée en partie par l'Homme.

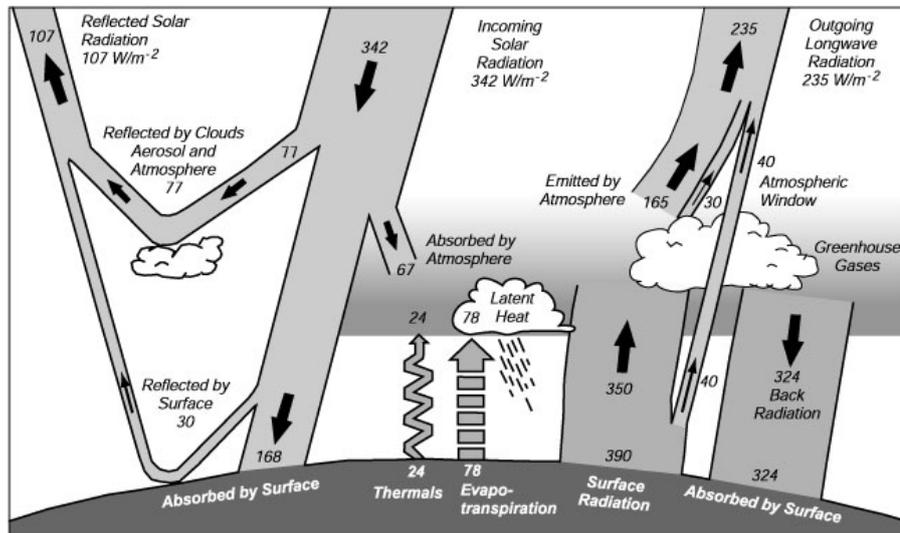


FIGURE 1.1 – Illustration du bilan radiatif de la Terre d'après Houghton *et al.* [Houghton *et al.*, 1996].

Schématiquement décrit sur la Fig. 1.1, ce bilan regroupe tout les flux entrants (rayonnement solaire incident) et sortants (rayonnement émis par la Terre, réfléchi par l'atmosphère, les nuages, les océans, ...). Tout d'abord, il faut noter une différence importante entre le flux d'énergie à priori disponible à la surface de la Terre et celui provenant du soleil. Cette différence est due essentiellement aux pertes lors de la traversée de l'atmosphère. Ces pertes se répartissent de la manière suivante :

- 6 % du rayonnement incident est réfléchi par l'atmosphère ;
- 16 % est absorbé par l'atmosphère ;
- 20 % est réfléchi par les nuages ;
- 3 % est absorbé par les nuages.

Le rayonnement incident à la surface de la Terre ne correspond qu'à 55 % du rayonnement au niveau de l'atmosphère. Sur la Fig. 1.2, on compare le spectre solaire (le soleil étant assimilé à un corps noir à 5800 K) au spectre du rayonnement solaire *AM1.5* après une traversée de 1.5 atmosphère. Les raies d'absorption sont liées aux gaz et molécules qui composent l'atmosphère. L'absorption de l'oxygène a lieu aux environs de 750 nm, celle de l'eau à 900, 1150, 1350 et 1800 nm.

D'un point de vue plus quantitatif, le rayonnement solaire parvenant au niveau de la haute atmosphère représente en moyenne 342 W/m². L'atmosphère et les nuages réfléchissent un peu plus de 20 % de ce rayonnement, soit environ 77 W/m², et en absorbent 19 %, soit 67 W/m². Le rayonnement solaire parvenant au sol n'est donc plus que d'environ 198 W/m². C'est ce

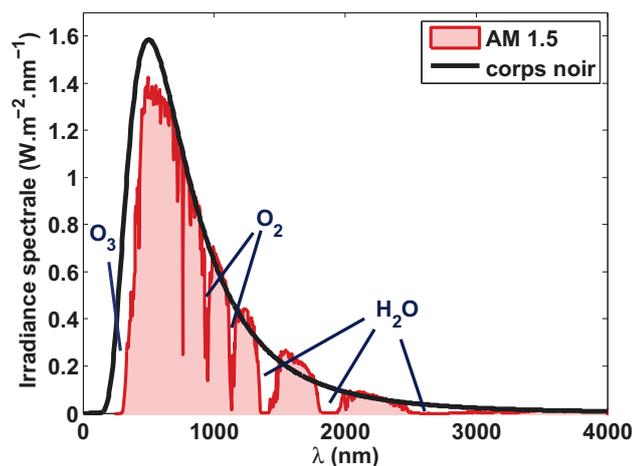


FIGURE 1.2 – Irradiance spectrale du soleil au niveau de la mer (courbe rouge) et spectre d’émission du corps noir à la température $T = 5800\text{ K}$ (courbe noire). Les raies d’absorption sont liées aux gaz et à l’eau dans l’atmosphère.

rayonnement qui pourra être utilisé pour des applications solaires. Avec une surface d’environ 500 millions de km^2 , la terre reçoit annuellement environ 10^9 TWh d’énergie solaire. En 2012, la consommation énergétique mondiale, toutes sources confondues, a représenté environ 145 000 TWh, soit 0.015 % de cette énergie.

1.1.2 La part du solaire dans la production et la consommation d’énergie

D’après le rapport de “BP Statistical Review of World Energy 2013” [BP, 2013], la production mondiale d’énergie renouvelable, c’est-à-dire la production d’énergie hydroélectrique, géothermique, éolienne et solaire, atteint 1068.5 Mtep^1 en 2012. Cette production représente environ 9.3 % de l’énergie consommée annuellement (11480 Mtep) (Fig. 1.3) La part de l’énergie solaire

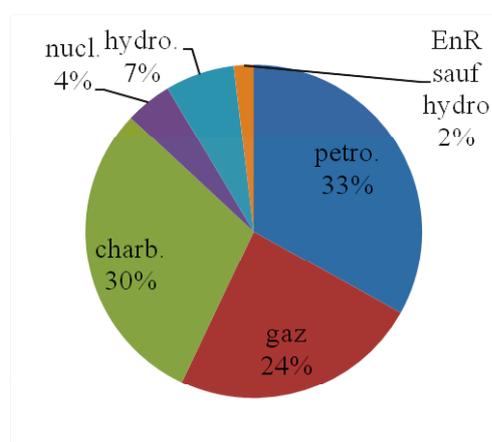


FIGURE 1.3 – Répartition par type de sources de la consommation énergétique mondiale en 2012 [BP, 2013]. La part liée aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) est largement majoritaire.

1. La tonne équivalent pétrole (tep) est une unité d’énergie. Elle vaut 11.63 MWh, soit 41.86 GJ

dans ces énergies renouvelables ne représente que 2 %, soit environ 0.2 % de l'énergie mondiale consommée (Fig. 1.4a).

On compte aujourd'hui deux voies pour la production d'électricité grâce à l'énergie provenant du soleil. Une production directe grâce à la conversion des photons par conversion photovoltaïque (PV) et une production indirecte qui passe par la production de chaleur après concentration du rayonnement solaire. Ce moyen de production est appelé *solaire thermique concentré* (CSP - *Concentrated Solar Power*). La capacité de production d'électricité grâce au solaire photovoltaïque est aujourd'hui d'environ 100 GW, tandis que le solaire concentré ne représente que 3.3 GW (fin 2013) [BP, 2013] (Fig. 1.4b). Le solaire thermique concentré ne représente donc qu'une très faible part de la production, et donc de facto de la consommation énergétique mondiale, malgré la nécessité de recourir de plus en plus aux énergies non-fossiles. Plusieurs scénarios prévoient dans le futur une utilisation plus importante des énergies renouvelables, associée à une diminution de l'utilisation des énergies fossiles et à une utilisation rationnelle de l'énergie. En France :

- Le scénario Negawatt [Association NegaWatt, 2014] repose sur une utilisation plus sobre et efficace de l'énergie, conduisant à une diminution de l'énergie consommée et à une très forte baisse de l'utilisation du pétrole et du gaz, ainsi qu'à la disparition totale de l'énergie nucléaire du mix énergétique. Comme le montre la Fig. 1.5, la part d'énergies renouvelables dans ce mix est fortement augmentée, mais c'est surtout la sobriété et l'efficacité qui sont importantes dans ce scénario.
- Le scénario Negatep [Sauvons le Climat, 2014] repose sur la modification du type de sources d'énergies utilisées entre 2006 et 2050 avec un niveau global de consommation qui demeure presque constant (Fig. 1.6).

Le point commun de ces deux scénarios est l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation globale d'énergie. Quant au solaire thermique concentré, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit en 2050 (Fig. 1.7) une croissance importante, particulièrement aux *États-Unis* et en *Afrique*. La production devrait atteindre 7800 TWh d'électricité produite par an grâce aux différentes technologies CSP, soit environ 15 % de la consommation mondiale actuelle [AIE, 2010].

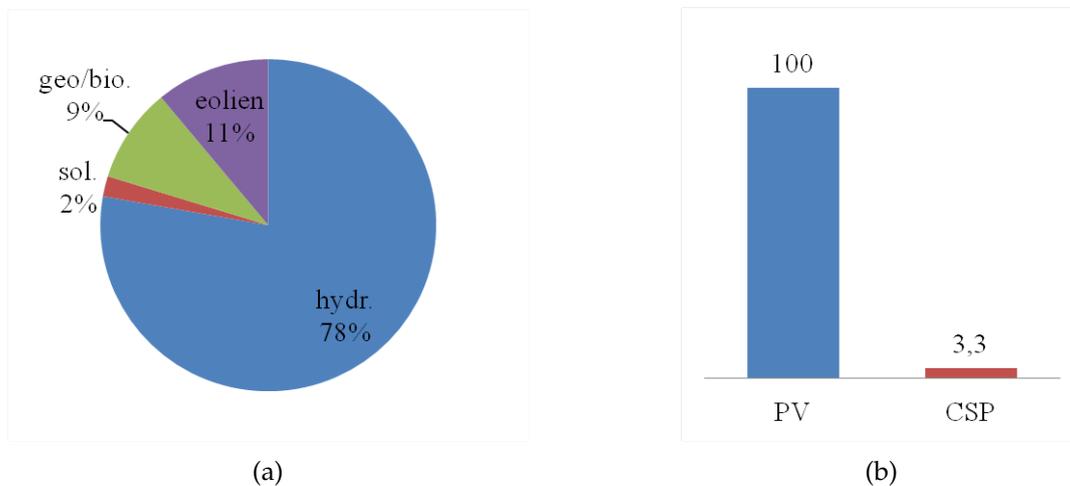


FIGURE 1.4 – (a) Répartition de la consommation énergétique mondiale des énergies renouvelables. La plus grande part provient de l'hydroélectricité. (b) Capacité de production d'énergie photovoltaïque et solaire thermique concentré en GW (fin 2013).

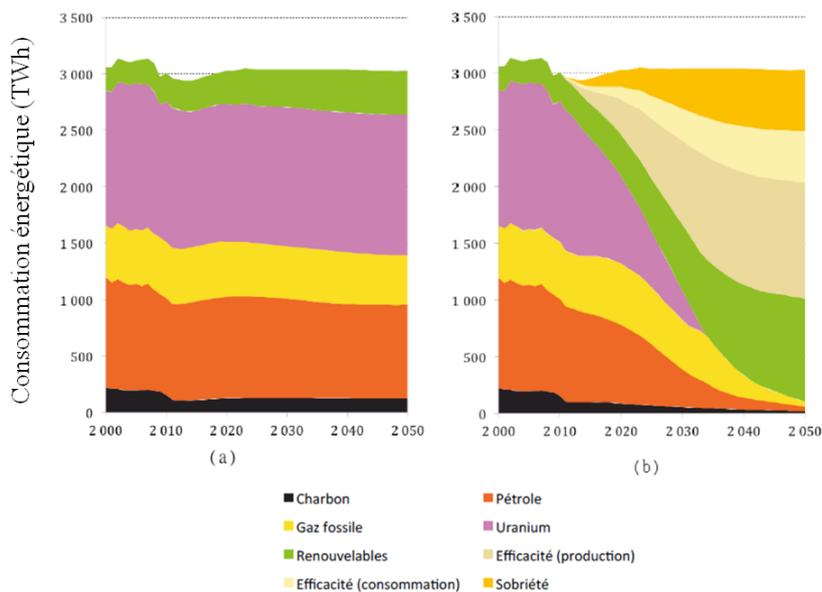


FIGURE 1.5 – Prévisions d'utilisations des énergies à l'horizon 2050. (a) Tendence actuelle. (b) Prévisions Négawatt. Les parties Efficacité et Sobriété correspondent à l'économie réalisée par rapport à la tendance.

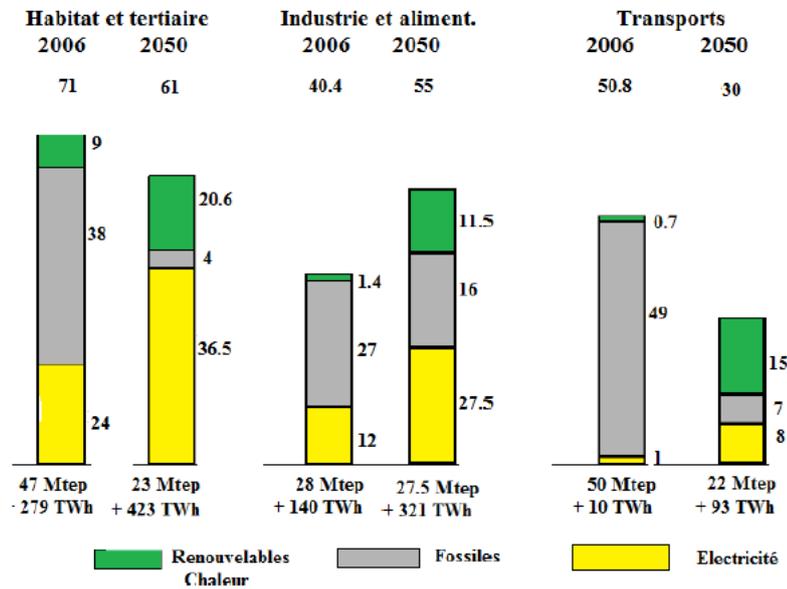


FIGURE 1.6 – Prévisions Négatep pour les secteurs du résidentiel-tertiaire, de l’industrie et du transport. Le besoin en énergie est fortement en baisse dans les secteurs résidentiel-tertiaire et transport, mais augmente dans le secteur de l’industrie. Mais cette augmentation s’accompagne d’une réduction de l’utilisation des énergies fossiles et d’une augmentation de l’utilisation de l’électricité, rendue possible grâce au nucléaire.

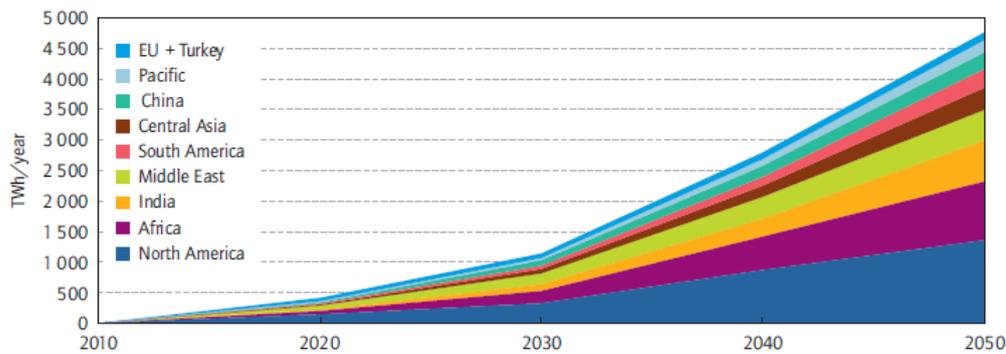


FIGURE 1.7 – Prévision de croissance du CSP pour différentes régions d’après l’AIE (CSP Technology Roadmap, 2010).

1.2 Les techniques pour le solaire thermique à concentration

1.2.1 Le solaire thermique concentré

1.2.1.1 D'hier à aujourd'hui

Depuis plusieurs siècles, l'énergie apportée par le soleil a été domptée par l'homme. La légende veut qu'en 212 av. JC, Archimède ait utilisé des boucliers de bronze afin de focaliser la lumière du soleil sur les bateaux romains assiégeant Syracuse (Fig. 1.8). Au milieu du XIXe



FIGURE 1.8 – Archimède concentrant la lumière du soleil sur les bateaux romains assiégeant Syracuse. Image provenant de la couverture d'une édition latine du *Traité d'Optique* de Alhazen.

siècle, le mathématicien Augustin Mouchot proposa un système de concentration composé d'un miroir parabolique afin de chauffer de l'eau et produire de la vapeur. Après plusieurs années, son assistant Abel Pifre et lui présentèrent le premier moteur fonctionnant grâce au soleil au cours de l'exposition universelle de Paris de 1882. Leur système était l'ancêtre des coupelles paraboliques actuelles. A partir de cette date, différents systèmes utilisant l'énergie solaire sont mis au point, dans un premier temps pour permettre l'irrigation, comme dans l'installation de Maadi en Égypte, d'une puissance de 88 kW. En 1968, Giovanni Francia met au point la première installation solaire concentrée moderne, d'une puissance de 1 MWth², située près de Gènes en Italie. Au cours des années 1980, la Californie va voir se construire un grand nombre de centrales solaires thermiques, allant des plus faibles puissances comme *Solar One* et ses 10 MWe, construite en 1981, jusqu'aux plus grandes, avec *Solar Energy Generating Systems* (SEGS), construite en 1984, d'une puissance de 354 MWe, qui est restée jusqu'en février 2014 la centrale solaire possédant la plus grande capacité au monde. Le développement du nucléaire et du photovoltaïque et la baisse des prix du pétrole entamés au milieu des années 80 vont mar-

2. Le Watt thermique (Wth) correspond à la production de puissance thermique. Il est à différencier du Watt électrique (We) qui correspond à la production de puissance électrique.

quer l'arrêt du développement technologiques de la filière solaire concentrée. Aujourd'hui, le solaire thermique concentré connaît à nouveau une période de fort développement, et de nouvelles centrales sont régulièrement construites en Espagne et aux États-Unis, mais aussi dans des pays où la présence du CSP est nouvelle, tels que les Émirats Arabes Unis, l'Inde où la Chine.

1.2.1.2 De l'énergie solaire à l'électricité

Le solaire thermique concentré permet soit la conversion directe de l'énergie provenant du soleil en chaleur, soit la conversion indirecte de cette énergie en électricité. Pour récupérer cette énergie, les installations CSP sont dotées de systèmes optiques permettant la concentration des rayons du soleil en un point focal, situé sur un récepteur, qui absorbe alors cette énergie et la restitue sous forme de chaleur. Cette chaleur est transformée et utilisée dans un système produisant de l'électricité grâce à un cycle thermodynamique ou directement dans des procédés industriels nécessitant une température importante. Une installation CSP est composée de trois parties bien distinctes :

- Le système optique concentrateur/collecteur qui permet de concentrer le rayonnement solaire et de capter son énergie sous forme de chaleur au niveau du collecteur ;
- Le convertisseur thermodynamique qui convertit la chaleur du collecteur en travail mécanique ;
- Le générateur électrique qui transforme le travail mécanique en électricité. Dans les installations qui utilisent directement la chaleur, ce générateur est absent.

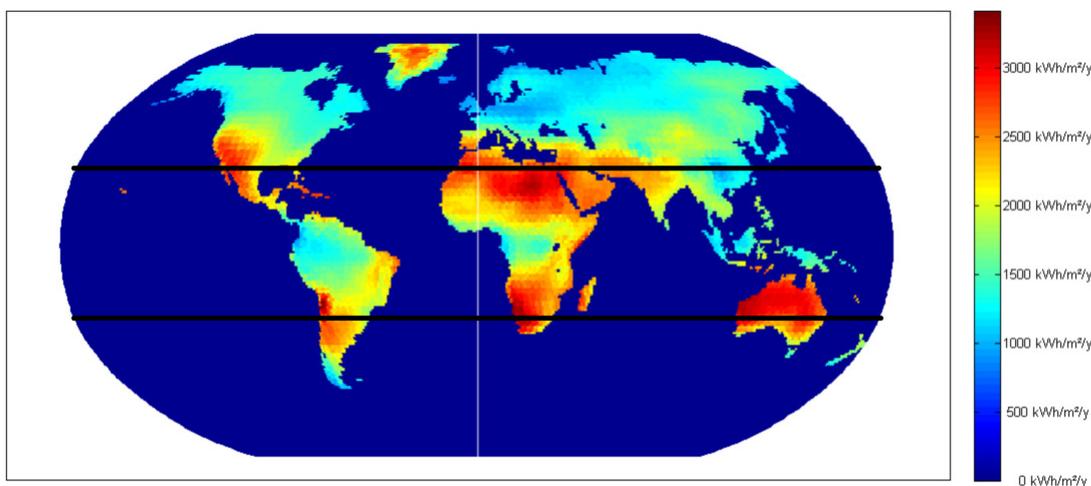


FIGURE 1.9 – Irradiance normale directe globale (DNI). Les endroits où l'ensoleillement est le plus adapté pour l'implantation des installations CSP sont en rouge. Ces données proviennent du Centre Aérospatial Allemand (DLR) et sont adaptées de données de satellites d'étude du climat [Breyer et Knies, 2009].

Pour produire efficacement la chaleur, les installations CSP sont soumises à certaines contraintes, principalement liées à la ressource solaire. En effet, pour que le rendement soit suffisamment élevé, ces installations doivent se situer dans des zones où l'irradiance normale

directe, c'est-à-dire le rayonnement direct (non-diffus) provenant du soleil, est supérieure à $2\text{MWh}/\text{m}^2/\text{an}$. La Fig. 1.9 montre que les zones possibles d'implantation sont principalement situées entre les tropiques. En Europe, l'Espagne, le Portugal et l'Italie semblent être des cibles potentielles pour l'implantation d'installations CSP, mais c'est surtout dans l'ouest des États-Unis, principalement la Californie et le Nevada, en Australie, dans le nord de l'Afrique et dans la péninsule Arabique que la ressource solaire semble la plus intéressante [Breyer et Knies, 2009]. De plus, contrairement aux technologies photovoltaïques qui utilisent aussi bien l'ensoleillement direct que le rayonnement diffus, les technologies CSP n'utilisent que le rayonnement direct. Les zones d'implantation doivent donc être le plus éloignées possibles des sources d'aérosols, telles que la pollution ou les poussières. Toutes ces contraintes rendent difficiles l'accès aux technologies CSP dans beaucoup d'endroits, ce qui augmente le coût de la production d'électricité.

D'un point de vue plus académique, les technologies CSP offrent des possibilités autres que la production d'électricité. En effet, la concentration du rayonnement du soleil permet de fournir une énergie suffisamment importante pour des procédés très énergivores, comme la production d'hydrogène à partir d'eau [Nakamura, 1977, Abanades *et al.*, 2006, Coelho *et al.*, 2010] où la fabrication de nanotubes de carbone et de fullerènes [Flamant *et al.*, 1999]. Ces technologies ouvrent alors de nouvelles perspectives pour ces recherches.

1.2.2 Les technologies actuelles

Quatre technologies permettent de convertir l'énergie provenant du soleil en électricité ou en chaleur via un cycle thermodynamique. Celles-ci sont classées en fonction du type de récepteur. On distingue deux familles de technologies :

- Technologies à récepteurs linéaires. Les systèmes de concentration de ces récepteurs focalisent les rayons du soleil tout au long d'un récepteur linéaire, le long duquel le fluide de transfert est chauffé. Les réflecteurs de ces systèmes ne peuvent bouger que dans une seule dimension.
- Technologies à récepteurs ponctuels. Contrairement au système précédant, le système de concentration focalise tout les rayons sur un seul point, ce qui permet d'atteindre une concentration plus élevée que dans les systèmes linéaires. Dans ces systèmes, les réflecteurs peuvent bouger dans deux dimensions.

1.2.2.1 Systèmes à récepteur linéaire

Nous présentons ici deux technologies à récepteurs linéaires.

a. Technologie cylindro-parabolique

La technologie à miroirs cylindro-paraboliques est composée de plusieurs rangées parallèles de miroirs cylindro-paraboliques courbés de telle sorte qu'ils focalisent les rayons sur le tube

collecteur situé sur la ligne focale des miroirs. Les miroirs peuvent se déplacer dans une dimension afin de suivre les mouvements du soleil (Fig. 1.10).



FIGURE 1.10 – (a) Schéma de principe d'un système cylindro-parabolique. (b) Photographie de la centrale solaire thermique SHAMS 1 utilisant la technologie des miroirs cylindro-parabolique.)

Ce système permet la concentration des rayons du soleil sur les tubes situés au point focal des miroirs, généralement revêtus d'un traitement sélectif qui permet une bonne absorption du rayonnement solaire, tout en évitant au maximum les pertes dans l'infrarouge. A l'intérieur de ces tubes circule le fluide caloporteur, généralement de l'huile synthétique, qui peut atteindre grâce à ce système de concentration une température de 400°C . Le fluide est ensuite dirigé vers un échangeur pour produire la vapeur qui actionnera la turbine. Cette technologie est aujourd'hui la plus mature et la mieux connue des technologies CSP. Elle est régulièrement utilisée pour des centrales commerciales de grande capacité, associée avec un stockage thermique et la possibilité d'être couplée avec des carburants fossiles.

b. Technologie de Fresnel linéaires

Comme pour les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques, les systèmes à miroirs de Fresnel linéaires concentrent les rayons provenant du soleil au niveau d'un collecteur situé sur la ligne focale des miroirs (Fig. 1.11). La différence majeure avec les systèmes cylindro-paraboliques vient du fait que les miroirs sont ici tous quasi-plans, mais leur inclinaison relative permet d'approximer la courbure d'une parabole rigide. Le principal avantage de cette technologie provient des miroirs utilisés. Ceux-ci étant plans et d'une taille moins importante que celle des miroirs cylindro-paraboliques, il est plus aisé de les fabriquer et leur mise en oeuvre est également plus facile. De plus, dans cette technologie, les collecteurs sont fixes ce qui permet d'éviter les sur-coûts liés à la présence d'un système de déplacement des tubes collecteurs comme dans le cas de la technologie cylindro-parabolique.

1.2.2.2 Systèmes à récepteur ponctuel

Nous présentons maintenant le principe de la technologie CSP basée sur l'utilisation de récepteurs ponctuels.

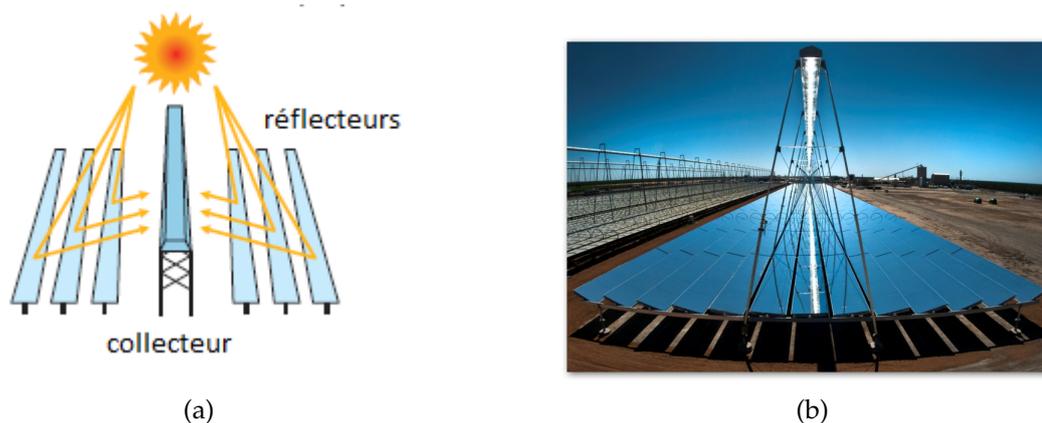


FIGURE 1.11 – (a) Schéma de principe d'un système Fresnel linéaires. (b) Photographie d'une rangée de miroirs de Fresnel linéaires. Les rayons sont concentrés sur le tube, en haut de l'image.

a. Technologie Dish Stirling

Dans les systèmes de concentration Dish Stirling, un miroir parabolique est utilisé pour focaliser le rayonnement solaire au point focal de la parabole comme illustré sur la Fig. 1.12. Contrairement aux autres technologies CSP, les systèmes Dish Stirling n'utilisent pas de fluide



FIGURE 1.12 – (a) Schéma de principe d'un système de concentration Dish Stirling. (b) Photographie de plusieurs concentrateurs Dish Stirling.

de transfert pour alimenter un cycle thermodynamique mais un moteur Stirling situé au point focal du système de concentration, et utilisent le rayonnement solaire converti en chaleur comme source chaude. Le récepteur étant relativement petit par rapport à la parabole, ce système permet d'obtenir des taux de concentrations très élevés et donc des températures très importantes, souvent supérieures à 1000 °C. La parabole étant fixée sur un support qui peut se déplacer dans deux dimensions, cette technologie permet de suivre la trajectoire apparente du soleil. Ces systèmes de concentration offrent aujourd'hui le plus haut taux de conversion du rayonnement solaire en électricité de toutes les technologies CSP. Ce taux peut atteindre approximativement 30 %. Un des principaux avantages de cette technologie réside dans sa modularité. En effet, contrairement aux autres technologies CSP, elle fonctionne en unité, ce qui permet de construire des petites unités de production. Cependant, les performances de cette

technologie la place en concurrence directe avec le PV, pour l'instant moins cher à mettre en oeuvre.

b. Technologie à tours solaires

La dernière technologie CSP est le système de tours solaires à concentration. Dans ce type d'installations, un champ de miroirs réflecteurs, que l'on appelle héliostats, focalise en un seul point le rayonnement solaire, situé au sommet d'une tour. Chaque héliostat est indépendant et peut-être orienté afin de suivre le mouvement du soleil (*sun tracking*) pour réfléchir précisément le rayonnement solaire (Fig. 1.13).

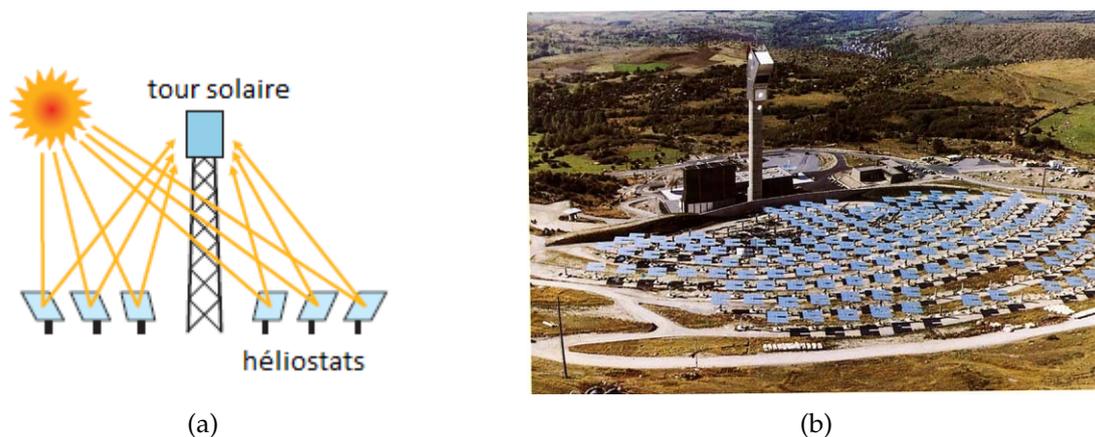


FIGURE 1.13 – (a) Schéma de principe d'un système CSP à tour solaire. (b) Photographie de la centrale Themis, située à Targassonne dans les Pyrénées-Orientales.

Le principal avantage de ces installations consiste dans le point de focalisation unique, qui permet d'obtenir des facteurs de concentration pouvant être supérieur à 1000, permettant d'atteindre des hautes températures, et augmentant ainsi le rendement de conversion chaleur - électricité. La haute température obtenue grâce au système de concentration permet d'utiliser différentes façons de produire de l'électricité :

- Génération directe de vapeur. Tout d'abord, comme pour la technologie Fresnel linéaire, la génération directe de vapeur (DSG, *Direct Steam Generation*) est possible, et permet l'utilisation directe d'une turbine à vapeur sans passer par un système de conversion. Mais le passage de la phase liquide à la phase vapeur peut entraîner des fortes contraintes thermo-mécaniques au niveau du récepteur, diminuant la durée de vie de celui-ci, ainsi que la fiabilité de la centrale. De plus, la DSG ne permet pas un stockage thermique efficace, les coûts de stockage de la vapeur étant très importants.
- Utilisation de sels fondus. Comme pour les systèmes cylindro-paraboliques, les systèmes à tour peuvent utiliser un fluide de transfert afin de conduire la chaleur vers un échangeur produisant de la vapeur. Celle-ci est ensuite dirigée vers une turbine à vapeur pour produire l'électricité (Fig. 1.14). Les sels fondus sont une bonne solution comme fluide de transfert car ils sont relativement bons marchés et permettent d'atteindre des températures élevées. De plus, il est facile de les stocker dans des cuves thermostatiques afin de pouvoir réutiliser la chaleur lors des pics de demande en la convertissant en électricité,

- via un cycle utilisant la chaleur des sels pour produire de la vapeur.
- Utilisation d'un cycle de Brayton. La dernière possibilité consiste à utiliser un gaz sous pression comme fluide de transfert. Ce gaz est chauffé au niveau du récepteur, puis est envoyé vers la turbine à gaz. Dans le cas où la température atteinte par le gaz n'est pas suffisante, il est possible d'hybrider la centrale solaire avec une centrale à gaz classique qui permettra de conserver une production constante. Dans ce cas, le stockage thermique n'est pas possible, mais l'hybridation permet une utilisation continue de la turbine à gaz. De plus, après le passage dans la turbine à gaz, la chaleur des gaz peut-être réutilisée pour générer de la vapeur utilisée dans une seconde turbine à vapeur.

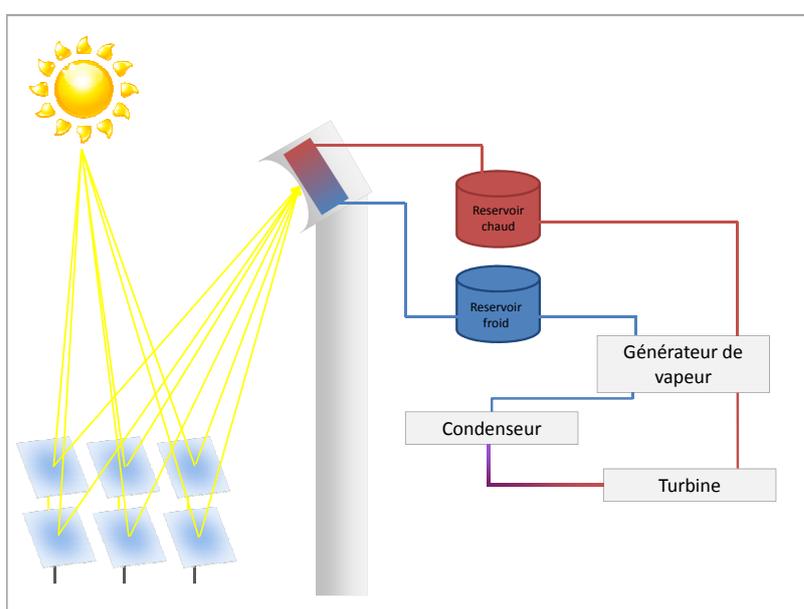


FIGURE 1.14 – Principe de fonctionnement d'une tour solaire utilisant des sels fondus comme fluide de transfert de chaleur. Le réservoir chaud correspond au stockage thermique.

Dans tous les cas, le rendement des cycles thermodynamique d'un système à concentration dépend de la température de la source chaude (ici, les fluides de transfert). Un bon moyen pour maximiser le rendement consiste donc à augmenter la température de ce fluide. En effet, à haute température, l'utilisation combinée d'un cycle de Brayton et d'un cycle de Rankine permet d'obtenir des taux de conversion de l'ordre de 50 %, bien supérieurs aux taux atteints par les cycles thermodynamiques utilisés à basse température, de l'ordre de 25 %. Dans cette thèse, nous avons choisi comme solution pour augmenter le rendement de développer un absorbeur spécifique, permettant de maximiser le captage de l'énergie provenant du soleil, tout en fonctionnant à haute température, c'est-à-dire en minimisant les pertes par rayonnement dans l'infrarouge ("*radiative cooling*").

1.3 Conclusion

Le solaire concentré thermodynamique représente aujourd'hui une alternative crédible à des centrales thermiques fonctionnant à l'aide de matières premières fossiles. En effet, la ressource solaire est une manne presque intarissable d'énergie, la seule limitation à son utilisation par le CSP étant d'ordre géographique. Nous avons montré que les différents scénarios envisagés pour la répartition énergétique future prédisent tous un large recours à l'énergie solaire. Néanmoins, le CSP a encore besoin aujourd'hui de se développer pour atteindre des coûts de production d'électricité plus proches de ceux offerts par les énergies fossiles et le solaire photovoltaïque. Parmi les pistes possibles pour réduire les coûts de production, l'augmentation des performances des absorbeurs est sans aucun doute prometteuse. Le développement d'une technologie CSP à haute température est également une direction de recherche importante pour atteindre ces objectifs. Dans les chapitres suivants, nous étudierons deux solutions pour permettre la conception d'absorbeurs sélectifs efficaces à haute température.

Chapitre 2

Absorbeurs solaires multicouches apériodiques

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 2.1 Structures multicouches apériodiques, une solution à de nombreux problèmes | 20 |
| 2.2 Équilibre thermique d'un absorbeur | 22 |
| 2.2.1 Flux incident | 23 |
| 2.2.2 Flux absorbé | 24 |
| 2.2.3 Flux émis | 25 |
| 2.2.4 Flux extrait | 26 |
| 2.2.5 Température d'équilibre | 26 |
| 2.2.6 Rendement de l'absorbeur | 26 |
| 2.3 Cas de l'absorbeur parfait | 27 |
| 2.3.1 Définition | 27 |
| 2.3.2 Bilan d'énergie | 27 |
| 2.3.3 Rendement | 28 |
| 2.4 Propriétés optiques d'un empilement multicouches | 32 |
| 2.4.1 Matrices de transfert et matrices de diffusion élémentaires | 32 |
| 2.4.2 Matrices de transfert et de diffusion pour une structure multicouches | 40 |
| 2.5 Optimisation des propriétés optiques par algorithme génétique | 45 |
| 2.5.1 L'algorithme génétique | 45 |
| 2.5.2 Design d'absorbeurs solaires multicouches par algorithme génétique | 49 |
| 2.6 Conclusion | 53 |

Les structures multicouches apériodiques représentent une solution relativement simple pour concevoir des absorbeurs sélectifs efficaces. En jouant sur les mécanismes d'interférences, la localisation de modes, etc, il est possible de sculpter leur spectre d'absorption. Dans ce chapitre, nous présentons le design d'absorbeurs multicouches capables de fonctionner efficacement à haute température

On décrit tout d'abord l'équilibre thermique d'un absorbeur solaire. Puis nous introduisons le concept d'absorbeur parfait et déduisons de ses caractéristiques le rendement maximal d'un

absorbeur solaire. Le spectre d'absorption de cet absorbeur idéal sera ensuite utilisé comme fonction objectif pour optimiser une structure multicouche à l'aide d'une méthode d'optimisation globale que nous décrirons en détail

2.1 Structures multicouches apériodiques, une solution à de nombreux problèmes

La théorie générale des couches minces, développée en 1950 par Florin Abelès [Abelès, 1950], a permis de comprendre le comportement des ondes électromagnétiques à l'intérieur des systèmes à couches minces multiples. Dès lors, un grand nombre de systèmes multicouches aux propriétés optiques originales ont été développés. Parmi ces structures, de nombreux absorbeurs sélectifs ont été conçus.

Au cours des années 50, Winfield Salisbury [Salisbury, 1952] développa l'écran de Salisbury pour rendre furtifs les avions face à la détection radar (Fig. 2.1). C'est l'un des premiers exemples d'absorbeur multicouche à bande étroite [Chambers, 1994]. Cet absorbeur est généralement composé de trois couches distinctes : un substrat métallique, une couche de matériau diélectrique transparente dont l'épaisseur fait un quart de la longueur d'onde incidente et une couche supérieure absorbante dite résistive. Ce type d'écran permet, grâce à un phénomène

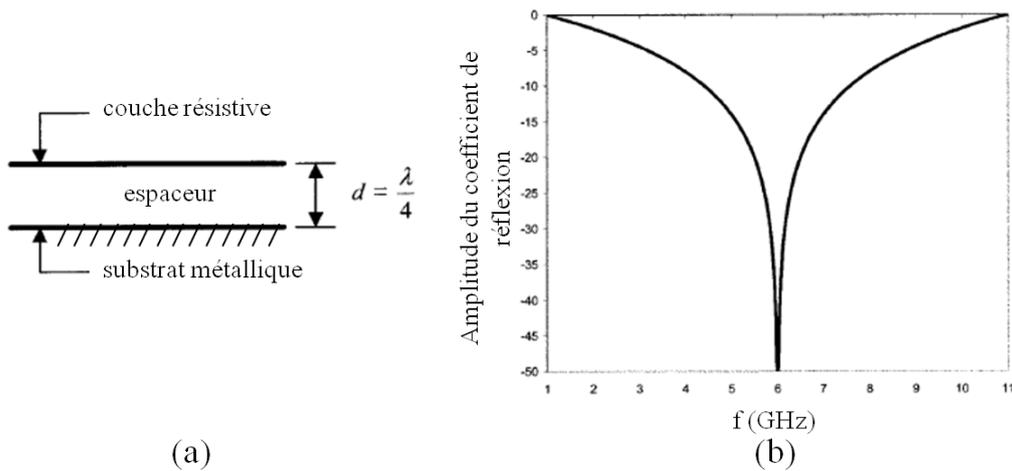


FIGURE 2.1 – (a) Ecran de Salisbury standard, composé d'un substrat, d'un espaceur diélectrique transparent dont l'épaisseur fait un quart de la longueur d'onde incidente et d'une couche résistive. (b) Coefficient de réflexion d'un écran de Salisbury standard [Kern et Werner, 2003].

d'interférences destructives [Fante et McCormack, 1988], de diminuer fortement la réflexion de la structure à la longueur d'onde du champ incident (Fig. 2.1b). Originellement développé dans le domaine radio, il est facile de réaliser cet écran pour n'importe quelle longueur d'onde, en ajustant l'épaisseur des couches et en choisissant convenablement les matériaux. Ce type d'absorbeurs à bande étroite est aussi très utilisé pour la détection dans le THz. En effet, dans cette gamme les ondes ont un fort pouvoir pénétrant et permettent de voir à travers les matériaux non conducteurs, tels que les plastiques. Cette propriété est largement utilisée dans le domaine

de la sécurité afin de détecter des armes, des produits dangereux ou des matières explosives. Cependant, la précision de l'écran de Salisbury est limitée. Contrairement à ce type d'absorbants, les structures multicouches ont montré leur capacité à absorber une longueur d'onde précise [Tao *et al.*, 2008]. L'introduction de défauts dans les structures périodiques a également permis de concevoir des absorbants quasi-monochromatique [Ben-Abdallah et Ni, 2005, Sang *et al.*, 2004] grâce à la présence de modes localisés dans les bandes interdites de ces structures (Fig. 2.2). Citons également les structures multicouches périodiques couplées à une couche de

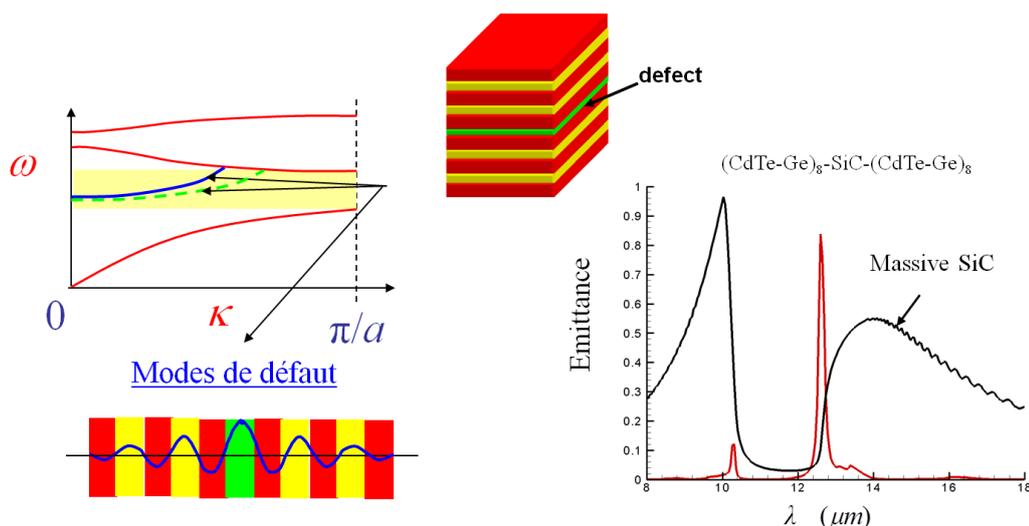


FIGURE 2.2 – Relation de dispersion d'une structure périodique (cristal photonique) en présence d'un défaut (couche de SiC). Le défaut est responsable de la présence de modes (en bleu et vert) dans la bande interdite du cristal. Ces modes de défaut sont localisés dans la structure mais ils peuvent être excités à travers le cristal ce qui conduit une absorption (emittance) localisée en fréquence.

matériau polaire qui permettent par l'intermédiaire du couplage du rayonnement incident avec le phonon-polariton de surface supporté par le matériau polaire (via le réseau périodique) d'obtenir une absorption localisée autour de la fréquence de ce mode de surface [Lee et Zhang, 2006] (Fig. 2.3). Ces détecteurs peuvent aussi être utilisés dans le domaine de la biologie, plus précisément dans le domaine de l'imagerie médicale, et permettent de différencier des tissus sains de tissus malades [Hu et Nuss, 1995]. La détection d'espèces chimiques est une application importante de ce type d'absorbant à bande étroite depuis le domaine visible jusqu'à l'infrarouge. Enfin, les absorbants à bande étroite sont des candidats naturels dans le domaine de la conversion thermophotovoltaïque. Ils ont permis de concevoir des émetteurs infrarouges capables de rayonner en direction des cellules PV précisément à la fréquence du gap de conversion de ces dernières [Nefzaoui *et al.*, 2012] et d'atteindre des rendements de conversion supérieurs à la limite de Shockley [Shockley et Queisser, 1961].

A l'opposé, les structures multicouches permettent également de concevoir des absorbants à large bande. Un exemple intéressant dû à Corrigan *et al.* [Corrigan *et al.*, 2012] consiste en une structure composée de fluorure de baryum et de nickel-chrome capable d'absorber le rayonnement sur une gamme de longueurs d'onde allant de 4 à 100 microns (Fig. 2.4). Un tel absorbant

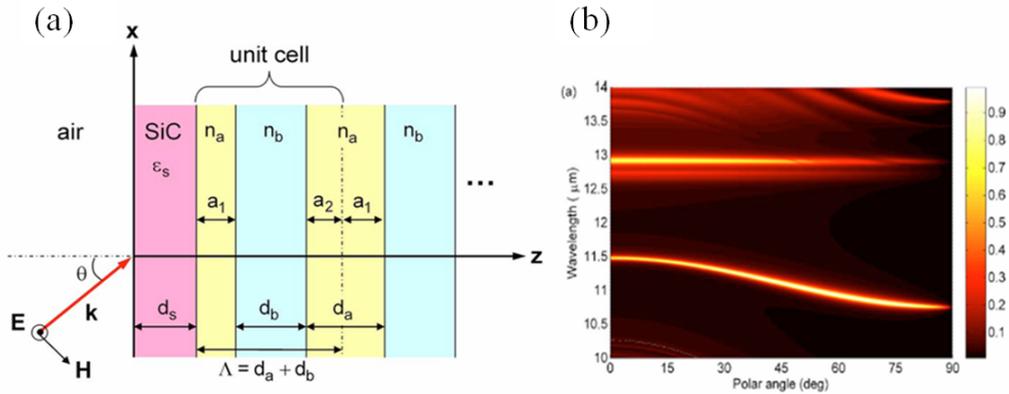


FIGURE 2.3 – (a) Source thermique partiellement cohérente étudiée par Zhang *et al.*, composée d’une couche de SiC collé à un cristal photonique 1D semi-infini pour une onde incidente polarisée *s*. (b) Emittivité spectrale et directionnelle de la structure en polarisation *s* [Lee et Zhang, 2006].

permet par exemple de capturer la chaleur perdue par rayonnement dans des procédés industriels lorsque la température est inférieure à 700 K. Les absorbeurs à large bande trouvent également des applications dans le domaine du refroidissement radiatif lorsque leur bande d’absorption coïncide avec une fenêtre de transparence de l’atmosphère [Rephaeli *et al.*, 2013].

La conception d’absorbeurs large bande est déjà un problème très ancien. En 1956, Tabor présente déjà le principe d’un absorbeur sélectif pour augmenter l’efficacité des collecteurs solaires [Tabor, 1956]. Depuis ces premiers travaux, de nombreuses structures ont été proposées [Hottel et Unger, 1959, Gillette, 1960, Kokoropoulos *et al.*, 1959, Schmidt et Janssen, 1964]. Cependant, ces structures sont inopérantes au dessus de 550°C. Récemment, des travaux ont été dédiés à la conception d’absorbeurs multicouches large bande capables de fonctionner à haute température [Sergeant *et al.*, 2009] et autour de multiples bandes étroites [Wang *et al.*, 2014]. Si les propriétés optiques de ces structures permettent d’obtenir des performances déjà très intéressantes pour le solaire concentré, celles-ci sont encore loin des limites théoriques [Langlais *et al.*, 2014b] et peuvent être encore améliorées. Ce sera l’objet du prochain paragraphe.

2.2 Équilibre thermique d’un absorbeur

Le fonctionnement d’un absorbeur solaire est schématisé Fig. 2.5. Il absorbe une partie du rayonnement solaire incident pour convertir son énergie sous forme de chaleur. Une partie de cette énergie est alors extraite de l’absorbeur pour être convertie en électricité, l’autre partie est ré-émise dans son environnement. Elle est alors perdue. Idéalement, un absorbeur doit capter toute l’énergie du champ radiatif incident et, dans le même temps, ne pas émettre dans son environnement. L’efficacité d’un absorbeur quantifie la propension qu’il a à absorber le rayonnement incident par rapport à celle qu’il a à se refroidir par "*radiative cooling*". Pour définir cette efficacité, il est primordial de connaître le spectre d’absorption depuis le visible jusqu’à l’infrarouge. Ce spectre nous permet de calculer le flux d’énergie incident absorbé par la structure

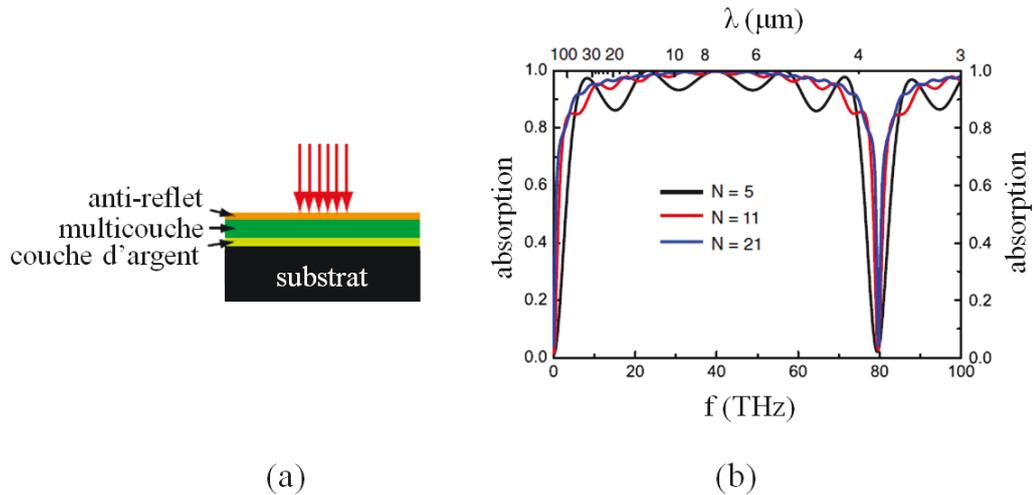


FIGURE 2.4 – (a) Absorbeur à large bande composé de fluorure de baryum et de nickel chrome. (b) Spectre d'absorption de la structure (a) en fonction du nombre de couches [Corrigan *et al.*, 2012].

ainsi que le flux sortant qui contribue à son refroidissement par radiation.

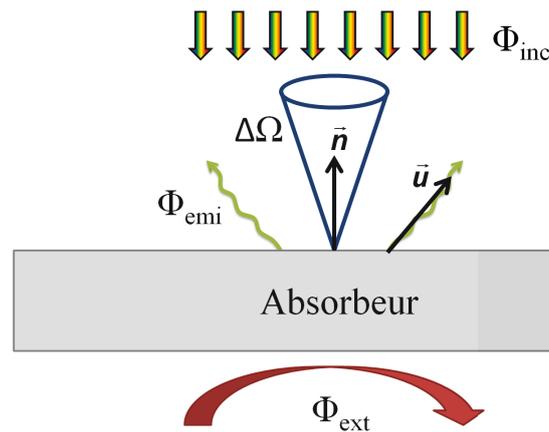


FIGURE 2.5 – Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un absorbeur destiné à une technologie CSP. L'absorbeur est éclairé par un flux incident Φ_{inc} sous un angle solide $\Delta\Omega$ autour de la normal à la surface. Une partie de ce flux est absorbé est contribue à chauffer l'absorbeur, tandis qu'un flux Φ_{emi} est rayonné dans toutes les directions et participe à son refroidissement. En face arrière, un flux de chaleur Φ_{ext} est extrait par convection ou par conduction pour être converti en électricité.

2.2.1 Flux incident

Le flux incident correspond au flux total provenant de la source primaire via le système de concentration, c'est à dire au rayonnement total issu de la source multiplié par un facteur de concentration \mathcal{C} qui tient compte du système optique situé en amont du récepteur. Lorsque la source est assimilée un corps noir de température T_S , le flux incident sous un angle solide $\Delta\Omega$

(typiquement $\sim 6.10^{-5}$ sr pour le soleil) s'écrit

$$\Phi_{inc}^{BB} = C \Delta \Omega \int_0^{\infty} L_{\lambda}^0(T_S) d\lambda, \quad (2.1)$$

où L_{λ}^0 désigne la luminance du corps noir

$$L_{\lambda}^0(T_S) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T_S \lambda}\right) - 1}, \quad (2.2)$$

h étant la constante de Planck, k_B la constante de Boltzmann et c la vitesse de la lumière dans le vide. Après intégration sur tout le spectre, le flux rayonné par la source et reçu par l'absorbeur s'écrit simplement

$$\Phi_{inc}^{BB} = \frac{C}{\pi} \Delta \Omega \sigma T_S^4, \quad (2.3)$$

où σ représente la constante de Stefan-Boltzmann. Nous retrouvons naturellement ici le flux rayonné par un corps noir sous un angle solide $\Delta \Omega$ et amplifié par le facteur de concentration C . Si, en dehors de l'atmosphère, le soleil peut être assimilé à un corps noir, comme nous l'avons vu au chapitre 1, les gaz présents dans l'atmosphère modifient notablement son spectre (cf. Fig. 1.2), de sorte que cette approximation n'est plus valable. Dans ce cas, la fonction de Planck (2.2) doit être remplacée par l'irradiance solaire $L_{AM1.5}$. Le flux incident s'écrit alors

$$\Phi_{inc}^S = C \int_0^{\infty} L_{AM1.5}(\lambda) d\lambda. \quad (2.4)$$

Notons ici que l'angle solide sous lequel est vu le soleil n'apparaît pas dans cette expression car il est déjà pris en compte dans la définition de l'irradiance solaire $L_{AM1.5}$.

2.2.2 Flux absorbé

Le flux absorbé par le collecteur correspond à la partie du flux incident qui n'est pas renvoyé dans l'atmosphère par réflexion. Pour calculer ce flux, il est nécessaire de définir l'absorptivité monochromatique spectrale $\alpha_i(\lambda, \mathbf{u})$ dans la direction \mathbf{u} de l'éclairement pour les deux états de polarisation s et p . Dans la suite, nous supposons que le système optique situé en amont de l'absorbeur concentre le rayonnement incident dans un petit angle solide $\Delta \Omega$ autour de la normale à la surface. Dans ce cas, le comportement optique de l'absorbeur est identique pour les deux états de polarisation de la lumière de sorte que l'absorptivité $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$. Lorsque la source est assimilée à un corps noir de température T_S , le flux incident s'écrit

$$\Phi_{abs}^{BB}(T_S) = C \Delta \Omega \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) L_{\lambda}^0(T_S) d\lambda. \quad (2.5)$$

Cette expression montre que le flux absorbé n'est rien d'autre que le flux incident pondéré pour chaque longueur d'onde λ par l'absorptivité $\alpha(\lambda)$ de la surface. Lorsque la source est le