

LE LASER SOLAIRE POUR GÉNÉRER L'ELECTRICITE ET D'AUTRES SOURCES DE CHALEUR

A. Kedadra¹, N. Hendaoui¹, R. Bouadjemine¹

¹ Centre de Développement des Technologies
Avancées, BP 17, Cité 20 Août 56, Baba Hassen, Alger

RESUME

La technologie de l'énergie solaire vise à fournir une énergie économiquement compétitive et respectueuse de l'environnement. Depuis 1966, plusieurs travaux de recherche dans le domaine du laser solaire ont été réalisés et l'énergie thermique produite est convertie en énergie mécanique, puis en électricité. Au sein de notre équipe Technologie des Systèmes Laser (TSL) au CDTA, un travail de développement du laser solaire est déjà initié et un démonstrateur de niveau TRL4 (technology readiness level), validation au laboratoire et en phase de maturation. Dans le cadre de cette étude, nous mettons le point sur le grand succès d'utiliser l'énergie solaire pour générer le faisceau laser qui nécessite généralement de l'énergie élevée pour être généré. Ensuite, nous montrons comment générer l'énergie électrique à partir de l'énergie propre, une perspective pour une autonomie énergétique.

Mots Clefs : Laser solaire; Concentration de la lumière solaire; Laser solaire et hydrogène;

Conversion de l'énergie solaire en électricité.

Author Correspondence, e-mail : akedadra@cdta.dz

1. INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie solaire thermique peut remplacer d'importantes quantités de combustibles fossiles afin d'éviter les changements climatiques [1]. La technologie de l'énergie solaire vise à fournir une énergie économiquement compétitive et respectueuse de l'environnement.

Plusieurs travaux de recherche dans le domaine du laser solaire ont été réalisés depuis 1966 afin de développer des lasers à solides, à gaz, à liquide et à semi-conducteurs [2-5]. Tout récemment, des systèmes hybrides de lentilles de fresnel et de concentrateurs paraboliques

avec des guides de lumière en silice fondue ont été impliqués pour augmenter les niveaux de concentration du rayonnement solaire et le gain optique dans les milieux amplificateurs lasers. L'énergie thermique produite est convertie en énergie mécanique, puis en électricité. L'avantage majeur par rapport aux convertisseurs photovoltaïques c'est qu'elle implique un intermédiaire thermique qui permet d'utiliser un système de carburant mixte pouvant être facilement intégrés dans la source thermique pour éviter la baisse de puissance de sortie lorsque le soleil est couvert de nuages. Au sein de notre équipe TSL au CDTA, un travail de développement du laser solaire [6] est déjà initié à travers une thèse de doctorat et un démonstrateur de niveau TRL4 (technology readiness level), validation au laboratoire et en phase de maturation.

Dans le cadre de cette étude : le laser solaire pour générer l'électricité et d'autres sources de chaleur, notre équipe compte élargir son activité pour une bonne maîtrise de la technologie laser solaire et ses applications. Notre communication consiste à mettre le point sur le grand succès d'utiliser l'énergie solaire pour générer le faisceau laser qui nécessite une énergie de pompage élevée. Ensuite, nous montrons comment générer l'énergie électrique à partir de l'énergie propre, une perspective pour une autonomie énergétique.

2. PRODUCTION DE L'ENERGIE A PARTIR DE L'ENERGIE SOLARE

Selon les statistiques de l'IEA en 2017, les combustibles fossiles fournissent 69% et le nucléaire 10,6% [7] de la demande d'énergie du monde. En raison d'une dépendance excessive aux combustibles fossiles, les émissions massives de CO₂ entraînent sérieusement le changement climatique mondial ainsi que l'augmentation du niveau de la mer [8]. Il est devenu impératif de développer de nouvelles sources d'énergie en remplacement de combustibles actuels. Les énergies naturelles basées sur l'énergie solaire ont attiré une attention significative. Cependant, l'offre instable ne répond pas à la demande de notre société actuelle. L'énergie solaire s'est révélée bien adaptée à un certain nombre d'applications spécifiques. Il permet de produire l'électricité par l'utilisation de modules photovoltaïque ou des centrales solaires photovoltaïques et il est consommé sans aucune perte de ligne d'où une économie du coût de construction de ligne et d'acquisition de câblage électriques. L'énergie

photovoltaïque est un enjeu mondial affirmé par la Cop21 et en novembre 2015 l'Alliance internationale (ISA : International solar alliance pour l'énergie solaire est lancée). En 2016, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 375 TWh, soit 1,8 % de la production totale d'électricité au niveau mondial et l'agence internationale de l'énergie prévoit que la part du solaire photovoltaïque dans la production mondiale d'électricité pourrait atteindre 16 % en 2050. En vertu du protocole de Kyoto, l'obligation de réduire les émissions de CO₂ et donc tous les pays du monde ont intensifié leurs programmes de R&D dans ce domaine afin de trouver un système énergétique alternatif qui n'utilise pas les matériaux fossiles. A titre d'exemple en France, Paris veut résolument se placer en tête de villes engagées dans la transition énergétique. En décembre 2017, elle assurait déjà vouloir chasser les voitures thermiques de ses rues dès 2040. Dans un nouveau plan climat, elle avance 500 mesures dont la volonté de s'alimenter entièrement aux énergies renouvelables dès 2050 [9].

Dans un avenir prévisible, l'énergie solaire ne représentera probablement qu'une très petite partie de notre mix énergétique global car ses coûts et sa fiabilité la désavantagent par rapport aux autres formes de production d'électricité. Cependant, il peut gagner en popularité dans des applications isolées pour certaines utilisations, et son utilisation a augmenté à mesure que les décisions gouvernementales obligeaient les consommateurs à utiliser davantage d'énergies renouvelables sans tenir compte des coûts.

3. ÉNERGIE SOLAIRE ET LE LASER SOLAIRE

3.1. Utilisation du Laser pour la Transmission de l'Energie Solaire

La lumière du soleil n'est disponible que dans la journée, elle ne peut pas être une alternative à la centrale thermique à moins que le système de stockage d'énergie efficace ne soit inventé. Par contre, si l'électricité produite à partir de l'énergie solaire doit être transportée sur une longue distance de l'endroit où la lumière du soleil est disponible, nous devons développer une nouvelle technique autre que le câble électrique. Il y a 40 ans, en analysant les diverses technologies, la transmission d'énergie électrique par micro-ondes était considérée comme la plus mature et la plus efficace mais nécessitait de très grandes antennes d'émission et de réception pour un bon couplage de puissance sur de longues distances. Par ailleurs, le concept de transmission de puissance laser a été connu et les lasers se développaient rapidement et

offeraient une réduction de dimensions géométrique des systèmes d'émission et de réception de l'ordre de 10^7 fois. Par conséquent, la transmission de puissance laser a été choisie pour son fort potentiel de rentabilité à long terme. Des applications ont été proposées pour fournir de l'énergie électrique en basse puissance pour les engins spatiaux en orbite terrestre [10], pour les lanceurs Terre-espace [11], et pour propulser des vaisseaux spatiaux à envoyer pour exploration des étoiles proches avec des lasers multi-gigawatts [12]. Les sources d'énergie primaire proposées pour le pompage laser ont été aussi variées que les réacteurs nucléaires [13-14], les cellules solaires photovoltaïques, les réactions chimiques [15], et la lumière solaire concentrée.

Au début des années 1980, un plan programme a été élaboré [16] pour mener des études de faisabilité et des recherches sur la transmission de puissance laser d'engin spatial à engin spatial pour la propulsion et la production de l'énergie électrique. Les applications civiles pour cette technologie à l'époque étaient considérées en long terme (pas avant l'an 2000). L'exigence portait sur une alimentation fiable, continue (CW) et supérieur à la puissance moyenne pour des missions de plusieurs années.

3.1. Energie solaire et Laser Solaire pour une Société Durable

L'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique et/ou en chaleur dépend essentiellement de la luminosité de la surface d'entrée du récepteur d'énergie solaire ainsi que de la réflexion, de l'ombre et d'autres pertes, tout dépend de la concentration d'énergie solaire. La conversion espace-phase et les considérations thermodynamiques placent une limite théorique à la concentration de la lumière solaire du dispositif optique considéré. Cette limitation est exprimée par la concentration maximale possible et réalisable [17]:

$$C_{\max} = \frac{n^2}{\sin^2 \alpha}, \quad (1)$$

Avec n l'indice de réfraction d'une surface cible et α la moitié de l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

Le laser pompé par énergie solaire a été proposé peu de temps après l'invention du laser [18] et la plus grande production était de 500W à partir de 660 m² d'optique de collecte [19,20]. D'autre part, le rendement laser/énergie solaire était inférieur à 1% due à l'utilisation du Nd-YAG comme milieu laser. En 2002, Saiki et al le laser à base du céramique YAG codopé au

Nd et Cr pompé par lampe aux halogénures métalliques (famille de lampe à arc) et ayant un spectre similaire que celui du rayonnement solaire a plus de rendement que celui du laser Nd YAG et il peut atteindre 30% [21]. Une telle expérience, est l'objet d'une étude approfondie et d'expérimentation très intéressante pour améliorer les performances et avoir un meilleur rendement du laser/énergie solaire en jouant aussi sur le paramètre focalisation.

Tout récemment, de nouveaux travaux [22-26] proposent une nouvelle procédure de production d'énergie propre en utilisant le laser pompé à partir de l'énergie solaire. Cette procédure consiste en la maîtrise de trois technologies clés:

- Le laser pompé par l'énergie solaire ;
- L'énergie stocké en magnésium (Mg) ;
- l'extraction d'énergie en utilisant le Mg.

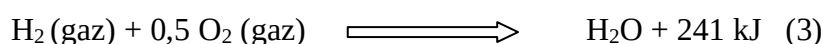
Ces trois technologies forment un cycle pouvant générer indéfiniment de l'énergie électrique et d'autres sources de chaleur en respectant l'environnement. Le magnésium en réaction avec l'eau génère de l'hydrogène et libère de l'énergie thermique, comme suit:



Lorsque le magnésium est chauffé jusqu'à 850°K, il réagit fortement avec l'oxygène générant une grande quantité de chaleur, ce qui à son tour maintient la température de réaction.

Une fois que nous allumons la réaction de magnésium, elle continue sans chaleur supplémentaire et si l'on ajoute de l'eau au magnésium réactif, l'eau est vaporisée et la réaction donnée par l'équation (2) se déclenche. La libération de chaleur de 359 kJ/mol soutient également la réaction.

L'hydrogène obtenu peut être utilisé comme combustible pour faire fonctionner une turbine d'une centrale électrique ou employé pour faire fonctionner des piles à combustible. Les deux techniques ou méthodes utilisent la combustion d'hydrogène qui donne de la vapeur d'eau avec de l'énergie additionnelle :



Le magnésium est inépuisable. Il est le deuxième élément présent en eau de mer 1,3g/litre et le 8^{ème} le plus riche en croûte terrestre sous forme d'oxyde de magnésium (MgO). La désoxydation de ce dernier pour récupérer le Mg, nous devrions le maintenir sous haute température d'environ 4000°K et aucun récipient ne peut garder une telle température très élevée. Par conséquent, il devrait être intéressant d'utiliser le laser qui peut fournir l'énergie d'une manière localisée temporellement et spatialement et le laser à pompage d'énergie solaire sera un outil prometteur pour une telle désoxydation

Par conséquent si le laser n'est pas produit par l'énergie des réacteurs thermiques, mais par les ressources naturelles (laser solaire), nous pouvons créer une société durable sans matériaux fossiles en convertissant ces énergies sous forme de magnésium comme réservoir d'énergie et nous pouvons utiliser la réaction magnésium-eau pour générer de l'énergie selon les besoins.

4. CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons synthétisé une démarche scientifique pour une mise sur pied d'un nouveau cycle énergétique exempt de combustibles fossiles. La réaction magnésium-eau est utilisée pour produire de l'électricité ainsi que des sources de chaleur. Le produit de réaction MgO est de nouveau désoxydé en magnésium obtenu par l'utilisation du laser pompé par le rayonnement solaire. Bien que l'énergie de la lumière du soleil est variable elle ne peut pas être emmagasinée, elle peut être accumulée et stockée sous forme de magnésium et avec de tels processus, nous sommes en mesure de réaliser une société durable. C'est une chaîne de processus : application de l'énergie solaire pour générer l'électricité et d'autres sources de chaleur, que notre équipe TSL au CDTA est engagée pour la mettre en oeuvre dont le travail de développement du laser solaire est déjà initié et un démonstrateur de niveau TRL4 (technology readiness level) est en validation au laboratoire et en phase de maturation.

6. REFERENCES

- [1] Axaopoulos, P. J. Solar thermal conversion. Active solar systems, (2010).
- [2] Young, C. G.. Applied optics, vol. 5, no 6, p. 993-997, 1966.

- [3] Williams, M. D.; Zapata, L., NASA TM87615,1985.
- [4] De Young, R. J., Walker, G. H., Williams, M. D., Schuster, G. L., & Conway, E. J.. (1987).
- [5] T. Yabe, S. Uchida, K. Ikuta, K. Yoshida, C. Baasandash, M. S. Mohamed, Y. Sakurai, Y. Ogata, M. Tuji, Y. Mori, Y. Satoh, T. Ohkubo, M. Murahara, A. Ikesue, M. Nakatsuka, T. Saiki, S. Motokoshi, and C. Yamanaka, Appl. Phys. Lett. 89, 261107(2006)
<https://doi.org/10.1063/1.2423320> 89, 261107
- [6] Bouadjemine, R., Liang, D., Almeida, J., Mehellou, S., Vistas, R.C., Kellou, A., Guillot, E. Opt. Laser Technol. 97, 1–11, 2017.
- [7] International energy agency, Key World Energy Statistics, 2017, p.30.
- [8] Mark Siddall, Thomas F. Stocker and Peter U. Clark, Nature Geo. 2, 571–575 (2009).
- [9] Visactu-climat-emmanuel-macron-souhaite-un-choc-des-modes-de-production-16050cf567f.pdf
- [10] Williams, M. D.; and Conway, E. J., eds.: Space Laser Power Transmission System Studies. NASA CP-2214, 1982.
- [11] Kantrowitz, Arthur: The Relevance of Space. Astronaut. d Aeronaut., vol. 9, no. 3, Mar. 1971, pp. 34-35.
- [12] Forward, Robert L.: A National Space Program for Interstellar Exploration. Res. Rep. 492, Hughes Research Lab., July 1975.
- [13] Thom, Karlheinz; and Schneider, Richard T.: Nuclear Pumped Gas Lasers. AIAA J., vol. 10, No 4, Apr. 1972, pp. 400-406 .
- [14] Rodgers, Richard J.: Initial Conceptual Design Study of Self-Critical Nuclear Pumped Laser Systems. NASA CR-3128, 1979.
- [15] Gross, R. W. F.; and Bott, J. F., eds.: Handbook of Chemical Lasers. John Wiley & Sons, Inc., c.1976.
- [16] De Young, R. J.; Walberg, G. D.; Conway, E. J.; and Jones, L. W.: A NASA High-Power Space-Based Laser Research and Applications Program. NASA SP-464, 1983.
- [17] R. Winston et al. Approaching 6the irradiance of the surface of the sun, Solar Thermal Technology, Proc. 4th Intern. Symposium, Santa Fe, N.M., pp. 579-587, (1988).
- [18] C.G.Young, A Sun-Pumped cw One-Watt Laser Appl. Optics 5, 993(1966).

- [19] V. Krupkin, Y. Kagan, A. Yogev, in: R. Winston, R. Holman (Eds.), Nonimaging Optics: Maximum Light Transfer II, Proc. SPIE 2016 (1993) 50.
- [20] M. Landoa, J. Kagana, B. Linyekina, V. Dobrusin, A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime, Optics Communications 222 , 371(2003) .
- [21] Saiki, T., Motokoshi, S., Imasaki, K., Fujita, H., Nakatsuka, M., & Yamanaka, C. (2007). Nd/Cr: YAG ceramic rod laser pumped using arc-metal-halide-lamp. Japanese journal of applied physics, 46(1R), 156.
- [22] T. Yabe, S. Uchida, K. Ikuta, K. Yoshida, C. Baasandash, M.S. Mohamed, Y. Sakurai, Y. Ogata, M. Tsuji, Y. Mori, Y. Satoh, T. Ohkubo, M. Murahara and A. Ikesue, Appl. Phys. Lett. 89, 261107(2006).
- [23] T. Yabe, M.S. Mohamed, S. Uchida, C. Baasandash, Y. Sato, M. Tsuji and Y. Mori., J. Appl. Phys. 101 , 123106(2007).
- [24] M.S. Mohamed, T. Yabe, C. Baasandash, Y. Sato, and Y. Mori, Shi-hua Liao, H. Sato, and S. Uchida, J. Appl. Phys. 104, 113110(2008).
- [25] T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, M. Nakatsuka, T. Funatsu, A. Mabuti, A. Oyama, K. Nakagawa, T. Oishi, K. Daito, B. Behgol, Y. Nakayama, M. Yoshida, S. Motokoshi, Y. Sato, and C. Baasandash, Appl. Phys. Lett. 90, 261120(2007).
- [26] T. Yabe, B. Bagheri, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, T. Funatsu, T. Oishi, K. Daito, M. Ishioka, N. Yasunaga, Y. Sato, C. Baasandash, Y. Okamoto, and K. Yanagitani, J. Appl. Phys. 104, 083104(2008).