



La piste moléculaire pour le stockage et la conversion d'énergie solaire

Léa CHOCRON

Résumé Face aux défis énergétiques et climatiques actuels, le développement de technologies capables de stocker et de restituer efficacement l'énergie solaire constitue un enjeu majeur. Cet article présente un système de stockage solaire thermique moléculaire (MOST) reposant sur des molécules photoisomérisables capables de capter l'énergie du rayonnement solaire et de la restituer sous forme de chaleur à la demande. Le système étudié est basé sur des molécules de la famille des diaryléthènes, conçues pour stocker l'énergie sous forme chimique après irradiation lumineuse. La libération de l'énergie est déclenchée par l'ajout catalytique d'un acide, permettant d'induire la réaction thermique inverse et de contrôler la restitution de la chaleur. Cette approche combine ainsi un stockage d'énergie sur de longues durées avec un déclenchement efficace et modulable de la libération thermique. Les résultats obtenus mettent en évidence le fort potentiel de ces composés pour des applications de stockage d'énergie solaire et ouvrent des perspectives pour le développement de systèmes MOST durables, recyclables et compatibles avec les exigences des technologies énergétiques bas carbone.

Mots-clés Stockage d'énergie solaire, photochromisme, diaryléthènes.

Abstract A molecular pathway for solar energy storage and conversion

In the context of current energy and climate challenges, the development of technologies capable of efficiently storing and releasing solar energy has become a major priority. This article presents a molecular solar thermal (MOST) energy storage system based on photoisomerisable molecules able to capture solar energy and release it as heat on demand. The system relies on diarylethene derivatives designed to store solar energy in the form of chemical potential upon light irradiation. The release of the stored energy is triggered by the catalytic addition of an acid, which induces the thermal back reaction and enables controlled heat generation. This approach combines long-term energy storage with efficient and tunable heat release. The results highlight the strong potential of these compounds for solar energy storage applications and open new perspectives for the development of sustainable, recyclable and carbon-neutral MOST technologies.

Keywords Solar energy storage, photochromism, diarylethenes.

<https://doi.org/10.63133/scf.act-chim.2026.512.03>

L'enjeu du stockage de l'énergie solaire

Face aux défis majeurs de la transition énergétique, l'énergie solaire s'impose comme la source d'énergie la plus abondante et l'une des plus propres de la planète. Déjà largement exploitée à l'échelle mondiale, notamment à travers les installations photovoltaïques, elle représente en 2024 près de 10 % de la production mondiale d'électricité, avec une croissance particulièrement marquée en Chine et aux États-Unis. En parallèle, d'autres technologies tirant parti du rayonnement solaire, en particulier pour ses propriétés thermiques, se développent rapidement, notamment pour la production d'eau chaude.

Mais ce potentiel reste encore largement sous-exploité. En cause : la nature intermittente du rayonnement solaire, soumise aux cycles jour/nuit et aux variations saisonnières. Qu'il s'agisse de produire de l'électricité ou de la chaleur, le solaire ne peut fonctionner de manière continue sans être couplé à une autre source d'énergie. Son déploiement à grande échelle dépend donc du développement de technologies de stockage, de conversion et de restitution à la fois fiables, abordables et facilement industrialisables.

Plusieurs stratégies ont ainsi vu le jour pour stocker l'énergie solaire, allant des solutions électrochimiques comme les batteries, aux approches thermodynamiques reposant sur des

matériaux à changement de phase. Parmi elles, les voies de stockage chimique apparaissent particulièrement prometteuses. L'une des plus emblématiques est celle des « carburants solaires », qui consistent à utiliser le rayonnement solaire pour déclencher des réactions chimiques produisant des molécules riches en énergie, telles que le dihydrogène ou le méthane [1]. L'énergie y est stockée sous forme chimique, puis libérée par combustion ou *via* des systèmes électrochimiques.

Les molécules photochromes relèvent le défi

Dans ce paysage en pleine mutation, une approche alternative et innovante a émergé : le stockage solaire thermique moléculaire, ou MOST (« *Molecular Solar Thermal Energy Storage* »). Ce concept repose sur l'utilisation de molécules photoisomérisables, appelées photochromes, dont le principe est schématisé en *figure 1* [2]. Sous l'effet de la lumière, celles-ci passent de manière réversible d'un isomère stable et peu énergétique (A) à un isomère métastable plus énergétique (B). L'énergie solaire est alors piégée sous forme de potentiel chimique, puis restituée à la demande grâce à un stimulus externe (lumière d'une autre longueur d'onde, courant électrique ou catalyseur) qui déclenche la réaction inverse $B \rightarrow A$ et libère la chaleur stockée.

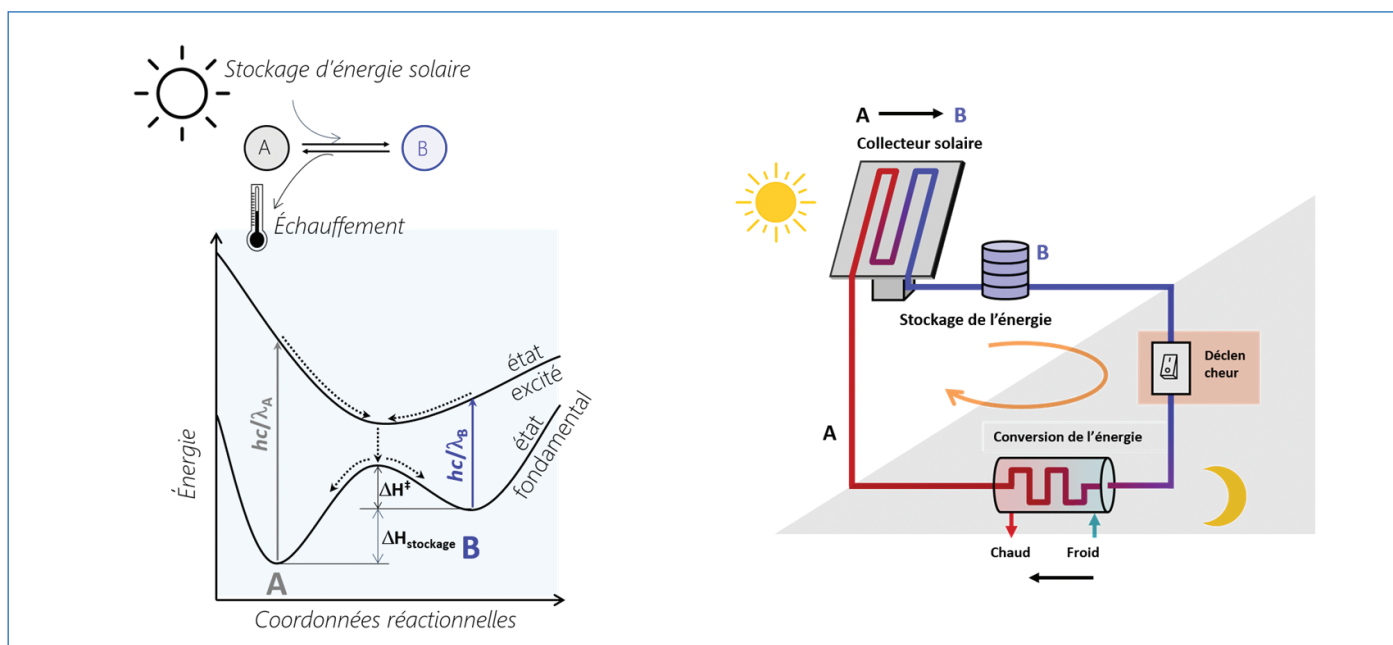


Figure 1 - À gauche : principe du stockage d'énergie solaire avec des molécules photochromes ; à droite : dispositif pratique de stockage et conversion d'énergie solaire avec des molécules photochromes.

Les systèmes MOST présentent des avantages majeurs par rapport aux technologies solaires plus conventionnelles. Contrairement au photovoltaïque, qui produit de l'électricité, une forme d'énergie souvent complexe et coûteuse à stocker, ils stockent directement l'énergie solaire au cœur même de la structure chimique des molécules, sans étape intermédiaire de conversion. Cette énergie est ensuite restituée sous forme de chaleur, directement exploitable pour des applications de chauffage. De plus, à la différence des carburants solaires, qui reposent sur le stockage de gaz, la combustion et des transformations chimiques irréversibles, les systèmes MOST utilisent des molécules en solution, faciles à manipuler et capables d'enchaîner des centaines de cycles charge/décharge sans dégradation notable.

Une mise en œuvre concrète de ce concept repose sur un système fluide, tel que celui présenté en figure 1. Dans ce dispositif, un fluide contenant la molécule photochrome circule d'abord dans un collecteur solaire, où l'irradiation déclenche la photoconversion A → B. L'énergie lumineuse incidente est alors stockée sous forme chimique dans le composé B, qui peut ensuite être conservé dans un réservoir dédié, idéalement sur de longues durées. Lorsque l'énergie doit être restituée, la réaction inverse B → A est déclenchée dans un réacteur de chauffage, entraînant la libération de chaleur. Une fois la réaction achevée, le composé A est régénéré et le fluide peut être réinjecté dans le circuit pour un nouveau cycle de stockage et de conversion de l'énergie. Pour être réellement performants, ces systèmes doivent toutefois répondre à plusieurs critères clés [3] : une grande différence d'énergie entre les deux isomères, une excellente stabilité à long terme de la forme métastable, une forte réversibilité et un déclenchement fiable et contrôlé de la réaction inverse. Bien que les bases du concept aient été posées dès le début du xx^e siècle et formalisées en 1979 [4], les avancées significatives vers des applications concrètes ne datent que des années 2010. Parmi les familles de photochromes étudiées, le couple norbornadiène/quadricyclane (NBD/QC) s'est distingué par une densité de stockage élevée – jusqu'à $1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ – et une synthèse relativement simple [5].

Malgré ces progrès, plusieurs verrous technologiques subsistent. L'un des principaux concerne le développement d'agents de déclenchement efficaces, accessibles et respectueux de l'environnement pour libérer l'énergie stockée à la demande. Les stratégies actuelles reposent souvent sur des catalyseurs métalliques ou des activations électrochimiques, faisant appel à des matériaux coûteux, rares ou potentiellement polluants, ce qui pose des problèmes de durabilité et de passage à l'échelle [6].

Une découverte collaborative

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail collaboratif de plusieurs équipes de recherche dont je fais partie. L'objectif de ce travail est de développer un système MOST fondé sur des molécules sensibles à un déclencheur acide. L'énergie y est stockée par conversion photo-induite d'une forme stable vers un isomère plus énergétique, puis restituée par une réaction thermique inverse déclenchée en présence d'acide. Encore peu exploré dans ce domaine, l'usage de l'acidité comme stimulus présente pourtant de nombreux atouts : les acides sont peu coûteux, non toxiques à faible dose, faciles à neutraliser et compatibles avec de nombreux environnements chimiques. Leur caractère réversible par ajout de base et modulable ouvre la voie à de multiples cycles de charge et de décharge, en accord avec les exigences de durabilité des technologies MOST de demain.

Pour relever ce défi, l'équipe a choisi d'explorer une famille prometteuse de photochromes : les diaryléthènes [7]. Reconnus pour leurs excellents rendements de photoconversion, leur grande stabilité thermique et leur forte résistance à la fatigue, ils sont particulièrement adaptés au stockage solaire moléculaire, bien que peu d'exemples d'application MOST aient été rapportés à ce jour. Les chercheurs ont alors conçu et étudié deux diaryléthènes fonctionnalisés par des groupements protonables, judicieusement positionnés au sein de la molécule [8].

L'étude de ces molécules a confirmé leur potentiel exceptionnel pour le stockage solaire thermique moléculaire. Capables

d'absorber efficacement la lumière, en particulier le rayonnement ultraviolet émis par le Soleil, elles se transforment en un isomère de plus haute énergie, apte à emmagasiner cette énergie sur des durées remarquables, allant de quelques jours à plusieurs années. À l'inverse, l'acidification du milieu agit comme un véritable « interrupteur thermique » : elle déclenche la réaction de retour et permet la libération de l'énergie sur des échelles de temps bien plus courtes, de quelques minutes à quelques heures. Avec une capacité de stockage de l'ordre de $100 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, ces composés pourraient théoriquement générer des élévations de température de plusieurs dizaines de degrés. Ces performances, combinées à leur stabilité sur le long terme et à l'efficacité du déclenchement acide, les placent parmi les systèmes MOST les plus prometteurs décrits à ce jour dans la littérature scientifique.

Mais l'innovation ne s'arrête pas là. L'un des aspects les plus marquants de ce travail réside dans l'exploitation du caractère catalytique de l'acide lors de la réaction de libération thermique. Contrairement aux approches classiques nécessitant un excès d'agent déclencheur, une simple quantité catalytique suffit ici à activer le processus. Cette stratégie renforce à la fois la durabilité et la recyclabilité du système. Une étude cinétique approfondie, combinant mesures expérimentales et modélisation numérique, a permis de décrypter le mécanisme réactionnel et de quantifier précisément l'efficacité de cette catalyse acide. Il s'agit d'un cas encore rare d'élucidation complète du mécanisme de libération d'énergie dans un système MOST. En mettant en lumière les phénomènes fondamentaux qui gouvernent cette réaction, ce travail ouvre la voie à une conception moléculaire plus rationnelle et plus performante pour les futurs matériaux de stockage solaire.

Ce projet illustre comment une approche interdisciplinaire, alliant chimie moléculaire, ingénierie des procédés et modélisation, peut transformer un concept fondamental en une solution énergétique concrète. Il s'inscrit pleinement dans les défis actuels liés à la transition énergétique et ouvre la voie à des systèmes autonomes et renouvelables.

Léa Chocron tient à remercier toutes les personnes ayant participé à ce projet, en particulier Dr. Fanny Schnetz (pour le schéma du système fluïdique), Dr. Pei Yu, Pr. Keitaro Nakatani et Dr. Rémi Métivier.

- [1] Z. Wang, Y. Hu, S. Zhang, Y. Sun, Artificial photosynthesis systems for solar energy conversion and storage: platforms and their realities, *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, *51*, p. 6704-37, <https://doi.org/10.1039/D1CS01008E>
- [2] J. Piard, Le photochromisme : définition et applications, *Le Bup*, **2013**, *107*, p. 549-59.
- [3] Z. Wang *et al.*, Storing energy with molecular photoisomers, *Joule*, **2021**, *5*, p. 3116-36, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.11.001>
- [4] G. Jones II, S.-H. Chiang, P.T. Xuan, Energy storage in organic photoisomers, *J. Photochem.*, **1979**, *10*, p. 1-8, [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(79\)80034-9](https://doi.org/10.1016/0047-2670(79)80034-9)
- [5] J. Orrego-Hernández, A. Dreos, K. Moth-Poulsen, Engineering of norbornadiene/quadracyclane photoswitches for molecular solar thermal energy storage applications, *Acc. Chem. Res.*, **2020**, *53*, p. 1478-87, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00235>
- [6] Z. Wang *et al.*, Macroscopic heat release in a molecular solar thermal energy storage system, *Energy Environ. Sci.*, **2019**, *12*, p. 187-93, <https://doi.org/10.1039/C8EE01011K>
- [7] M. Irie, T. Fukaminato, K. Matsuda, S. Kobatake, Photochromism of diarylethene molecules and crystals: memories, switches, and actuators, *Chem. Rev.*, **2014**, *114*, p. 12174-277, <https://doi.org/10.1021/cr500249p>
- [8] L. Chocron *et al.*, Acid-sensitive photoswitches: towards catalytic on-demand release of stored light energy, *Chem. Sci.*, **2024**, *15*, p. 16034-9, <https://doi.org/10.1039/D4SC04973J>

Léa CHOCRON a été doctorante au laboratoire PPSM de l'ENS Paris Saclay. Elle est lauréate du Prix Jeunes Talents France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2025.

* lea.chocron@ens-paris-saclay.fr

12 - 16
July
2026

Antwerp, Belgium

10
10th EuChemS
Chemistry Congress

euchems2026.eu

EuChemS
European Chemical Society

kvcv