

Stockage thermique durable pour le Sahel : étude des propriétés de stockage à température ambiante des huiles de *Lannea* pour la technologie solaire à concentration.

Mahamadou MAIGA, Kokouvi Edem N'TSOUKPOE*

Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabERE), Département Génie Électrique, Énergétique et Industriel, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso

*(auteur correspondant : edem.tsoukpo@2ie-edu.org)

Résumé - Dans cette étude, nous avons évalué l'impact du stockage à température ambiante sur les huiles de graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et *Lannea kerstingii* (LaKSO). Après un an de vieillissement avec et sans métaux industriels, leurs propriétés thermophysiques et chimiques sont restées stables en absence de métaux. L'acier inoxydable 316L et l'aluminium se sont révélés compatibles, tandis que l'acier galvanisé et le cuivre ont légèrement accéléré l'oxydation. Globalement, LaMSO et LaKSO présentent une bonne stabilité à long terme, avec une résistance à l'oxydation plus marquée pour LaKSO.

Abstract - In this study, we evaluated the impact of ambient temperature storage on the seed oils of *Lannea microcarpa* (LaMSO) and *Lannea kerstingii* (LaKSO). After one year of aging with and without industrial metals, their thermophysical and chemical properties remained stable in the absence of metals. Stainless steel 316L and aluminum were found to be compatible, while galvanized steel and copper slightly accelerated oxidation. Overall, LaMSO and LaKSO exhibit good long-term stability, with LaKSO showing greater resistance to oxidation.

1. Introduction

Face aux défis énergétiques du Sahel, la technologie solaire à concentration (CSP) a été identifiée comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques, notamment dans les zones rurales. Dans le cadre du projet CSP4Africa [1], différents aspects du développement de microcentrales CSP à forte valeur ajoutée locale en Afrique de l'Ouest ont été explorés. L'objectif était d'utiliser des ressources locales pour réduire les coûts et rendre la technologie plus durable. Sur le plan du stockage thermique, plusieurs huiles végétales produites localement, comme celles de *Jatropha curcas* (JaCCO et RJCO) [2], *Lannea microcarpa* (LaMSO) [3] et *Lannea kerstingii* (LaKSO) [4], ont été testées comme fluides caloporteurs (HTF) et de stockage de chaleur à température élevée. Ces quatre huiles végétales ont présenté des potentiels prometteurs pour ces applications. Cependant, pour envisager leur intégration dans les infrastructures industrielles existantes, il est essentiel d'évaluer leur compatibilité avec les métaux utilisés dans ces systèmes, que ce soit à température élevée pour simuler les conditions opératoires des systèmes ou à température ambiante pour simuler le stockage des huiles et les arrêts de longue durée des systèmes supposés les utiliser.

Cette étude a pour objectif d'évaluer la stabilité au stockage à température ambiante des huiles de *Lannea* en l'absence et présence des métaux d'ingénierie courants : acier inoxydable (316L), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu), et l'acier galvanisé (GS). L'investigation se base sur des tests d'immersion des métaux [5] dans les deux huiles à température ambiante à l'ombre

pendant une année. Cela permet de prédire la résistance des métaux étudiés à la corrosion, ainsi que leurs effets potentiels sur les propriétés thermophysiques de ces deux huiles.

2. Matériel et méthodes

Dans cette étude, les matériaux suivants ont été utilisés :

- Les huiles des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et *Lannea kerstingii* (LaKSO) extraites à la presse à 70 °C. Les propriétés thermophysiques et chimiques des deux huiles ont été initialement mesurées, car elles sont influencées par divers paramètres, notamment la qualité de la matière première, les conditions de stockage, etc.
- Différents échantillons métalliques d'une longueur de 5 cm, d'une largeur de 1 cm et d'une épaisseur variant de 1 mm à 3 mm : acier inoxydable 316L (316L), aluminium (Al), cuivre (Cu) et acier galvanisé (GS).
 - (i) L'acier inoxydable 316L (3 mm d'épaisseur) a été obtenu auprès de la société Köhler en Allemagne.
 - (ii) Les trois autres échantillons métalliques (1 mm d'épaisseur), à savoir l'aluminium, le cuivre et l'acier galvanisé, ont été obtenus localement auprès d'entreprises spécialisées.
- Papiers abrasifs de rugosité P60
- Tubes cylindriques en verre borosilicaté d'un volume de 30 mL
- Balance analytique Precisa XT 220A : plage de pesée allant de 0 g à 220 g, avec une précision de 0,0001 g

La procédure expérimentale, résumée à la Figure 1, s'inspire de la norme ASTM G31 [5] pour analyser la stabilité au stockage des deux huiles (LaMSO et LaKSO) en présence de métaux (316L, Al, Cu, GS) à température ambiante.

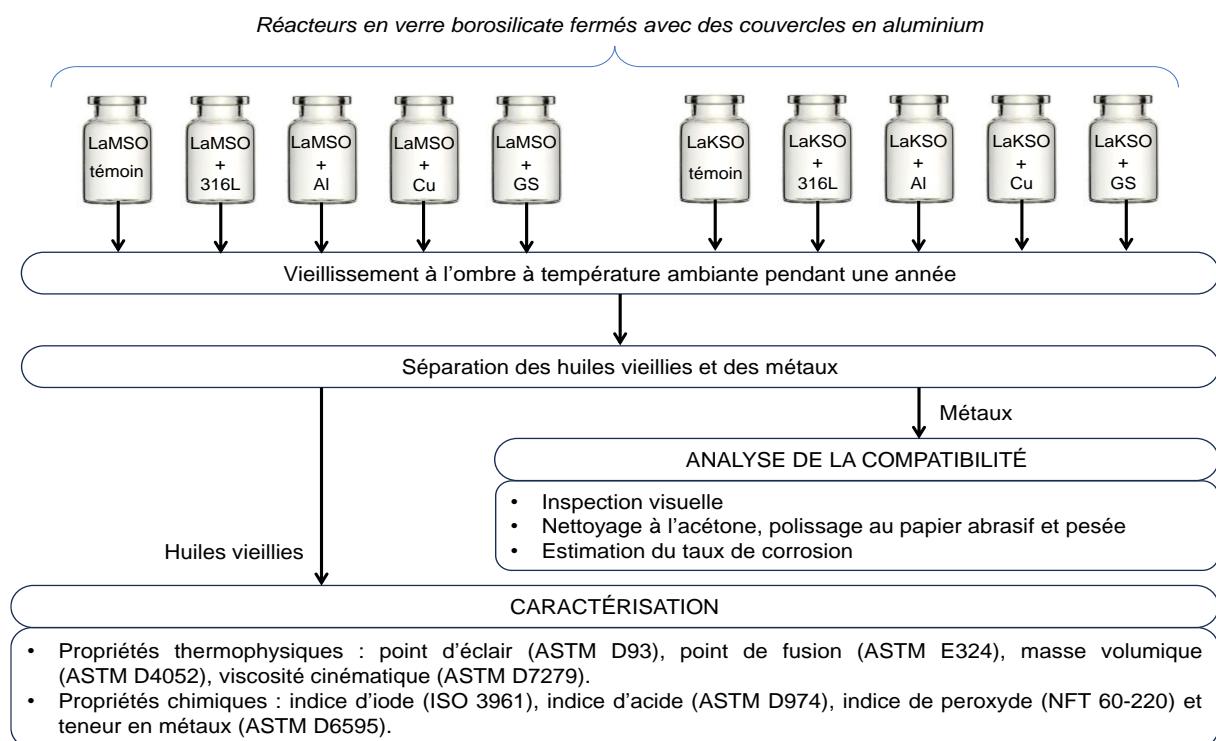


Figure 1: Résumé de la procédure expérimentale

Les échantillons métalliques (Figure 2a), préparés conformément à la norme ASTM G1 [6], ont été polis au papier abrasif, nettoyés à l’acétone, pesés, puis immergés séparément dans des réacteurs en verre borosilicaté contenant chaque espèce d’huile. Le test a été conduit en trois exemplaires à température ambiante à l’ombre pendant une année (Figure 2b et c). Dans la nomenclature adoptée ici, “LaMSO” et “LaKSO” désignent les huiles neuves, tandis que les échantillons vieillis sont nommés selon leurs conditions de vieillissement. Par exemple, “LaMSO-1Y” correspond à LaMSO vieilli pendant une année en l’absence de métal, et “LaMSO-316L-1Y” désigne LaMSO vieilli pendant une année avec l’acier inoxydable 316L. De même, “LaKSO-1Y” correspond à LaKSO vieilli pendant une année en l’absence de métal, et “LaKSO-316L-1Y” désigne LaKSO vieilli pendant une année avec l’acier inoxydable 316L. Le même schéma s’applique également aux autres métaux (Al, Cu et GS).

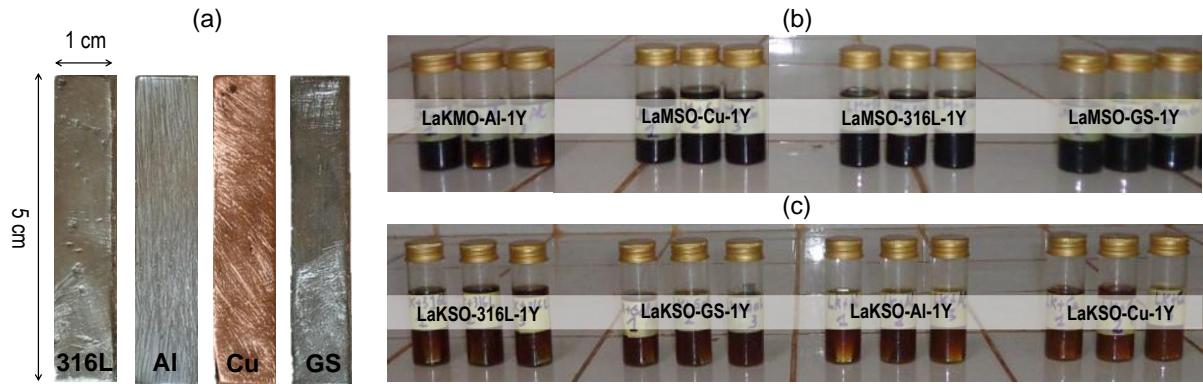


Figure 2: présentation a) des échantillons métalliques et (b,c) d’huiles les contenant

Au terme du test de vieillissement, tous les échantillons d’huiles ont été caractérisés. La caractérisation a consisté à déterminer les propriétés thermophysiques et chimiques suivantes : le point d’éclair (ASTM D93), le point de fusion (ASTM E324), la masse volumique (ASTM D4052), la viscosité cinématique (ASTM D7279), l’indice d’iode (ISO 3961), l’indice d’acide (ASTM D974), l’indice de peroxyde (NFT 60–220) et la teneur en métaux (ASTM D6595). Les méthodes décrites dans Ref. [3] ont été adoptées. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme des moyennes statistiques accompagnées de leurs écarts types.

Les taux de corrosion (CR) des métaux ont été calculés selon l’équation (1). Ils ont permis d’évaluer la résistance à la corrosion des métaux selon le système proposé par Biernat et al. [7].

$$CR [\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}] = 8,76 \cdot 10^4 \times \frac{M_i - M_f}{S \times t \times \rho} \quad (1)$$

Où : M_i [g] et M_f [g] sont respectivement les masses initiales et finales de l’échantillon métallique ; S [cm^2] est la surface métallique immergée ; t [h] est la durée du test de corrosion ; et ρ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] est la masse volumique de l’échantillon métallique.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse de la stabilité au stockage des propriétés thermophysiques des deux huiles

Les propriétés des échantillons de LaMSO et LaKSO vieillis pendant un an en l’absence et présence des métaux à température ambiante sont présentés respectivement aux figures 3 et 4. Étant des huiles extraites de graines de différentes espèces d’arbres du même genre, le stockage a eu des impacts négligeables et similaires sur les propriétés thermophysiques des deux huiles.

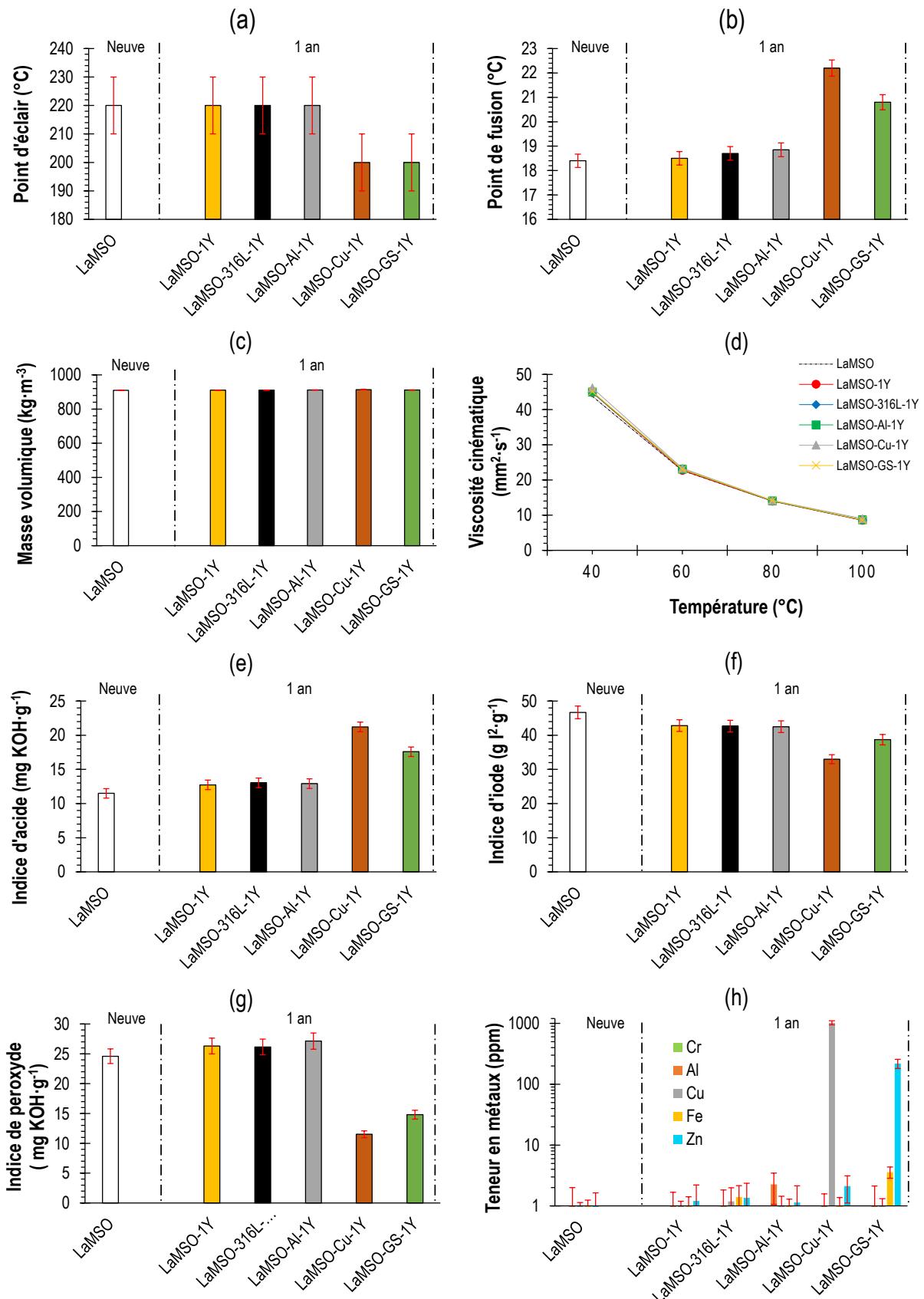


Figure 3: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux

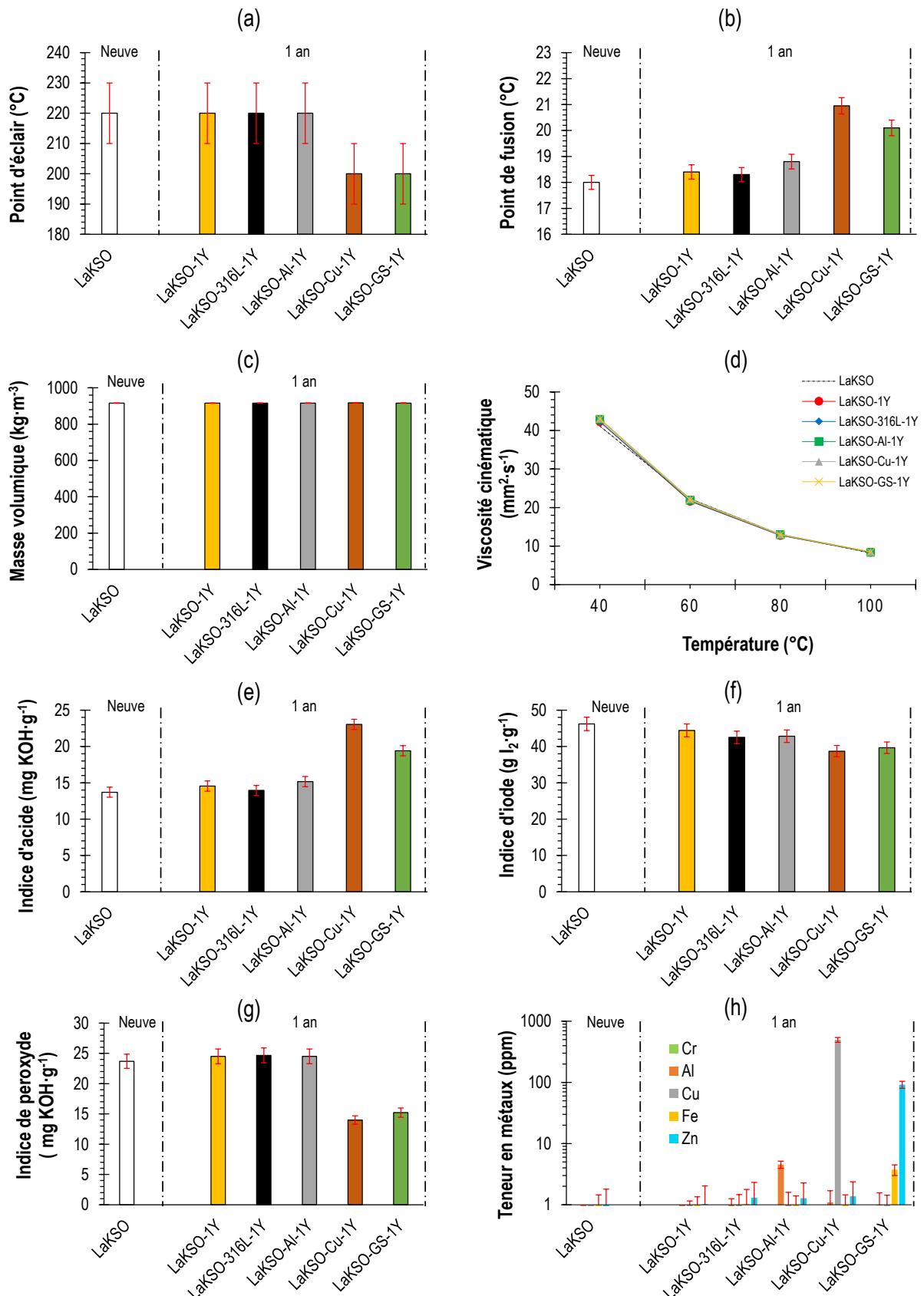


Figure 4: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieillis en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinétique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux

Tout d'abord, les échantillons témoins, c'est-à-dire ceux vieillis en l'absence des métaux ont montré que les propriétés des deux huiles sont restées largement stables. Aucune évolution significative n'a été observée pour les propriétés analysées. Ce résultat est en accord avec les suggestions des indices d'iode déterminés, catégorisant LaMSO et LaKSO comme des huiles saturées et non siccatives [3,4].

Le point d'éclair s'est annoncé largement stable à 220 ± 10 °C (figures 3a et 4a) pour les échantillons de LaMSO et LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium. Aucune évolution n'a été observée, tout comme chez les échantillons témoins. Par contre, le point d'éclair des échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé, a baissé à 200 ± 10 °C (figures 3a et 4a), restant toujours plus élevé que le point d'éclair du fluide caloporteur prédominant dans les centrales CSP, Dowtherm A [8]. La baisse du point d'éclair dans les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et l'acier galvanisé suggère une décomposition des triglycérides contenus dans ces huiles en acide gras libres par une oxydation causée par les métaux concernés à température ambiante [8], ce qui est cohérent avec l'augmentation observée de l'indice d'acide (figures 3e et 4e) et la baisse de l'indice de peroxyde (figures 3g et 4g) dans ces échantillons avec le vieillissement. Les études antérieures [2–4,8] ont également rapporté une baisse du point d'éclair, alors que l'indice d'acide augmentait avec le vieillissement.

Le point de fusion est aussi resté stable autour de 18 °C (figures 3b et 4b) dans les marges d'erreur des mesures effectués pour les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium après une année de vieillissement à température ambiante, tout comme les échantillons témoins. Cependant, dans les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé, le point de fusion a augmenté respectivement d'environ 4 °C et 2 °C (figures 3b et 4b). Cette tendance, expliquée par la saturation des huiles [8], a été confirmée par la baisse en indice d'iode (figures 3f et 4f) des échantillons concernés, avec les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre qui ont les plus grands points de fusion, présentant les plus faibles indices d'iode. L'indice d'iode des échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, ainsi que les échantillons témoins, a présenté une baisse de moins de 10 % par rapport l'indice d'iode des huiles neuves.

La masse volumique des deux huiles est également restée stable à un peu plus $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (figures 3c et 4c), après une année de vieillissement en présence des métaux à température ambiante, les très faibles variations observées étant dans la marge d'incertitude des mesures. Ce résultat suggère un impact très limité des métaux sur la masse volumique de ces deux huiles.

Bien qu'une différence négligeable (figures 3d et 4d), dans la limite de 5 % d'augmentation, ait été observée à 40 °C, la viscosité des échantillons huiles vieillis est restée largement similaire à la viscosité des huiles neuves dans la plage de température allant de 60 °C à 100 °C, après une année de vieillissement à température ambiante en présence des métaux. Dans le présent contexte, cela suggère que le stockage à température ambiante n'a pas d'impact majeur qui puisse entraîner une augmentation de la charge de pompage de LaMSO et LaKSO comme HTF.

3.2. Vitesse de corrosion des métaux au terme du test

La Figure 5 montre que les deux huiles ont produit des effets similaires sur les métaux investigués. L'acier inoxydable 316L, l'acier galvanisé et l'aluminium ont conservé leur aspect initial, tandis que le cuivre, devenu verdâtre, révèle la formation d'oxyde de cuivre. Ces observations sont en accord avec les vitesses de corrosion déterminées (Figure 6), qui montrent que le cuivre fut significativement affecté ($13 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour LaMSO et $4 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour LaKSO), contrairement aux autres métaux, qui enregistrent des taux de corrosion inférieurs à $0,6 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$.

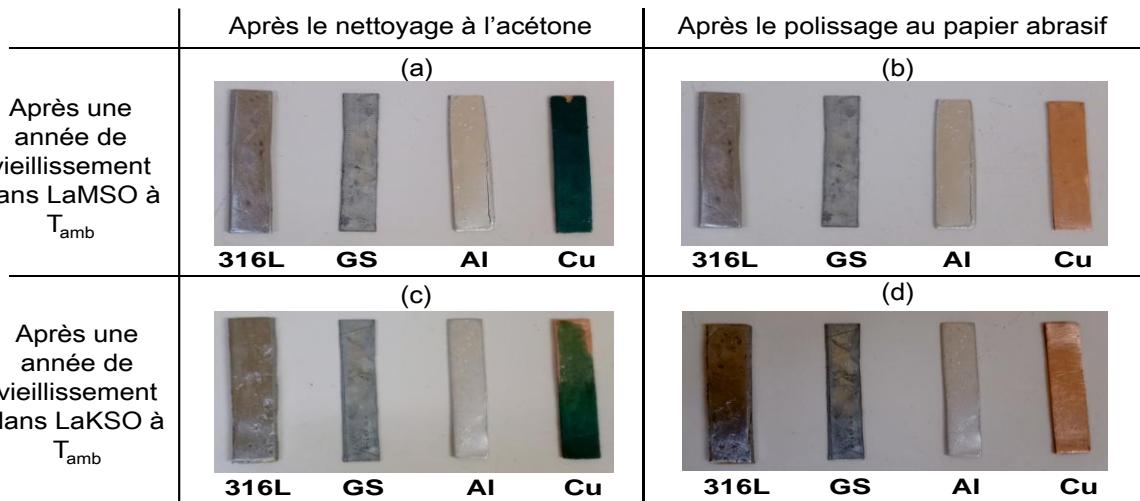


Figure 5: Échantillons métalliques après (a,c) le nettoyage à l'acétone et (b,d) le polissage au papier abrasif au terme du test de vieillissement dans (a,b) LaMSO et (c,d) LaKSO

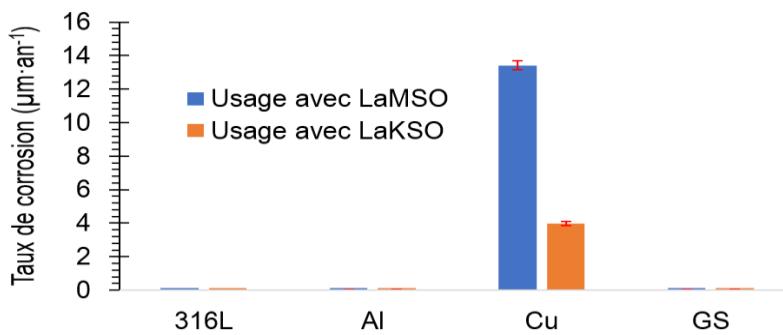


Figure 6: Taux de corrosion des métaux

3.3. Analyse de la compatibilité des deux huiles avec les métaux

L'observation générale issue de cette étude suggère que les propriétés des deux huiles vieillies en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium ne diffèrent pratiquement pas de celles observées en leur absence. Par conséquent, il est déduit que l'acier inoxydable 316L et l'aluminium n'ont pas eu d'impact majeur sur les propriétés des deux huiles. Cette observation a été confirmée par les teneurs en chrome et en aluminium négligeables (inférieures à 2 ppm) mesurées respectivement dans les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium (figures 3h et 4h).

En revanche, des variations légères ont été observées dans les propriétés des échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et l'acier galvanisé. Bien que ces variations soient négligeables pour les propriétés thermophysiques analysées – masse volumique, point d'éclair, point de fusion et viscosité –, les propriétés chimiques montrent qu'une interaction a eu lieu entre les deux huiles et le cuivre, et l'acier galvanisé, ce qui s'est traduit par des teneurs en cuivre, en zinc et en fer extrêmement élevées dans les échantillons concernés.

En se basant sur la classification proposée par Biernat et al. [7], tous les métaux sont jugés hautement résistants aux deux huiles, à l'exception du cuivre avec LaMSO, dont le taux de corrosion dépasse $10 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$. Par ailleurs, aucun des métaux n'a eu d'impact majeur sur les propriétés thermophysiques des deux huiles qui sont les propriétés d'intérêt dans le présent contexte. Par conséquent, ils sont tous considérés compatibles pour le stockage, avec l'acier inoxydable 316L en tête de liste, suivi par l'aluminium. Le cuivre vient en dernière position.

4. Conclusion

Les huiles des graines *Lannea microcarpa* (LaMSO) et *Lannea kerstingii* (LaKSO) ont récemment été proposées comme fluides de transfert et de stockage thermique pour les applications à température élevée, en particulier le solaire à concentration. Cette étude examine la stabilité au stockage des propriétés de ces deux huiles, en interaction avec les métaux courants dans les technologies solaires à concentration : acier inoxydable 316L (316L), aluminium (Al), cuivre (Cu) et acier galvanisé (GS). Après une immersion prolongée d'un an, 316L et Al n'ont entraîné aucune dégradation notable des deux huiles, confirmant leur compatibilité avec elles. Cu et GS ont présenté des interactions chimiques mineures, sans affecter significativement les propriétés thermophysiques des deux huiles (point d'éclair, point de fusion, masse volumique et viscosité). Ces résultats montrent que LaMSO et LaKSO peuvent être stockées en toute sécurité dans des réservoirs fabriqués à partir de ces métaux (316L, Al, Cu et GS) à température ambiante et, de même, ne présentent pas de risque majeur de corrosion pour les systèmes composés de ces métaux lors des arrêts de longue période, soutenant ainsi l'utilisation des deux huiles de *Lannea* comme fluides de transfert et de stockage thermique durable au Sahel.

Références

- [1] N'Tsoukpoe KE, Azoumah KY, Ramde E, Fiagbe AKY, Neveu P, Py X, et al. Integrated design and construction of a micro-central tower power plant. *Energy for Sustainable Development* 2016;31:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.11.004>.
- [2] Gomna A, N'Tsoukpoe KE, Le Pierrès N, Coulibaly Y. Thermal stability of a vegetable oil-based thermal fluid at high temperature. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 2020;12:317–26. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1732080>.
- [3] Maiga M, N'Tsoukpoe KE, Gomna A. Experimental study of *Lannea microcarpa* seed oil as a heat transfer fluid or thermal energy storage material for medium-temperature applications. *Energy Reports* 2024;12:4129–42. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.10.001>.
- [4] Maiga M, N'Tsoukpoe KE. *Lannea kerstingii* seed oil for sustainable thermal energy storage: Thermophysical properties, medium-temperature stability and interaction with common engineering metals. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2025;282:113367. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113367>.
- [5] ASTM International. Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals 2021. <https://www.astm.org/standards/g31> (accessed May 30, 2024).
- [6] ASTM International. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens 2017. <https://www.astm.org/g0001-03r11.html> (accessed May 30, 2024).
- [7] Biernat K, Ziolkowska M, Wardzinska D. Corrosiveness of Fuels During Storage Processes. *Storage Stability of Fuels*, IntechOpen; 2015. <https://doi.org/10.5772/59798>.
- [8] Gomna A, N'Tsoukpoe KE, Le Pierrès N, Coulibaly Y. Review of vegetable oils behaviour at high temperature for solar plants: Stability, properties and current applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2019;200:109956. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109956>.

Remerciements

Ce travail a reçu un financement de la commission européenne dans le cadre du projet H2020/LEAP-RE [N° de subvention : 963530]. Nous remercions aussi le laboratoire TotalEnergies du Burkina Faso pour son soutien technique dans les mesures de viscosité, de masse volumique, de point d'éclair et de teneur en métaux. Mahamadou MAIGA est spécialement reconnaissant envers l'office allemand d'échanges universitaires (DAAD) pour lui avoir accordé une bourse pour ses études de doctorat [N° de référence : 57587957, 2021].