

Contribution du recyclage des canettes en aluminium comme standard pour la production d'hydrogène vert

Ruslan Balacci

Département de Génie Electrique
Université Technique de Moldavie
Chişinau, République de Moldavie
ORCID: 0009-0001-7822-0703

Résumé — Cet article présente la contribution du recyclage des canettes en aluminium comme standard pour la production d'hydrogène vert. L'étude analyse le potentiel de récupération de l'aluminium issu des déchets urbains, sa conversion en hydrogène par réaction chimique et l'intégration de ce procédé dans un modèle industriel durable. L'approche met en évidence la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'économie circulaire et la rentabilité énergétique. Les résultats démontrent que le recyclage des canettes d'aluminium peut devenir une filière stratégique pour la transition énergétique et la production d'hydrogène à faible empreinte carbone.

Mots-clés — *recyclage, aluminium, canettes, hydrogène vert, économie circulaire, production durable*

I. INTRODUCTION

La transition énergétique mondiale exige le développement de filières de production d'énergie à faible empreinte carbone. Parmi les vecteurs énergétiques prometteurs, l'hydrogène vert occupe une place stratégique en raison de sa polyvalence, de son potentiel de décarbonation et de ses applications industrielles et de mobilité. Cependant, les procédés actuels de production d'hydrogène vert, notamment l'électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables, restent coûteux et nécessitent une optimisation des sources de matières premières et des infrastructures. Le recyclage des canettes en aluminium représente une opportunité double : réduire l'impact environnemental des déchets métalliques et fournir une matière première réactive pour la production d'hydrogène par réaction chimique avec des solutions alcalines [1]. Ce procédé, intégré dans un modèle d'économie circulaire, permet non seulement la valorisation énergétique de l'aluminium usagé [3-5], mais aussi la récupération de sous-produits utiles, tels que l'aluminat de sodium [3].

Cette étude vise à analyser le potentiel du recyclage des canettes d'aluminium en tant que standard industriel pour la production durable d'hydrogène vert, en évaluant les aspects techniques, économiques et environnementaux de la filière [5].

II. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

A. Approche expérimentale

La recherche s'appuie sur des essais en laboratoire visant à évaluer la production d'hydrogène à partir de canettes en aluminium recyclées. Les échantillons d'aluminium ont été nettoyés, pesés et introduits dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à concentration contrôlée. La réaction chimique a été menée dans un réacteur fermé équipé d'un capteur de pression et d'un débitmètre pour mesurer en continu le volume d'hydrogène produit. Les paramètres étudiés incluent la concentration de NaOH, la température de réaction, la granulométrie de l'aluminium et le temps de réaction. Les

données recueillies ont été enregistrées à intervalles réguliers pour permettre une analyse cinétique précise.

B. Analyse et normalisation des données

Les résultats expérimentaux ont été traités statistiquement afin d'évaluer la reproductibilité et la performance du procédé. Les volumes d'hydrogène ont été corrigés pour les conditions standard de température et de pression (STP) cela correspond aux conditions conventionnelles utilisées pour rapporter et comparer les volumes de gaz [4] :

- Température standard : 0 °C (273,15 K)
- Pression standard : 1 atm (101,325 kPa)

Ainsi, lorsqu'on parle de « litres d'hydrogène à STP », cela signifie que le volume a été corrigé comme si le gaz était mesuré à 0 °C et 1 atmosphère, afin de pouvoir comparer les résultats quelle que soit la condition réelle de laboratoire et rapportés à la masse initiale d'aluminium. La méthodologie inclut également une comparaison avec les standards industriels de production d'hydrogène vert, permettant d'identifier les écarts de performance et les marges d'optimisation. Un indicateur global d'efficacité a été proposé, intégrant à la fois le rendement énergétique, la pureté de l'hydrogène et la valorisation des sous-produits.

III. RÉSULTATS

A. Production d'hydrogène

Les essais en laboratoire ont montré que 1 kg d'aluminium issu de canettes recyclées pouvait produire en moyenne 1110 litres d'hydrogène aux conditions standards (STP), avec un rendement de conversion supérieur à 92 %. La variation de la concentration en NaOH entre 2 mol·L⁻¹ et 5 mol·L⁻¹ a révélé un optimum de production à 4 mol·L⁻¹, au-delà duquel l'augmentation de la vitesse de réaction n'a pas significativement amélioré le volume total d'hydrogène obtenu. Dans la réaction chimique, le sous-produit principal est l'aluminat de sodium NaAl(OH)₄, voir la réaction (1).



B. Analyse environnementale et économique

La modélisation du procédé a montré que le recyclage des canettes en aluminium pour la production d'hydrogène vert peut réduire les émissions de CO₂ de 9,5 kg par kilogramme d'aluminium recyclé, comparé à la production primaire d'aluminium. Sur le plan économique, la vente conjointe d'hydrogène et de sous-produits (aluminat de sodium) permet de compenser les coûts de collecte et de traitement des canettes, assurant une rentabilité dès une capacité de traitement de 500 tonnes/an. Les résultats indiquent que l'intégration de ce procédé dans une chaîne de production d'hydrogène vert

peut contribuer à la sécurisation de l'approvisionnement énergétique tout en renforçant l'économie circulaire.

IV. DISCUSSION

A. Contribution de l'aluminat de sodium

Dans la réaction chimique, le sous-produit principal est l'aluminat de sodium $\text{NaAl}(\text{OH})_4$. En conditions optimales, chaque kilogramme d'aluminium transformé génère environ 3,7 kg d'aluminat de sodium en solution. Ce composé peut être recyclé dans des procédés chimiques industriels ou converti à nouveau en aluminium métallique par électrolyse, permettant ainsi d'augmenter le rendement global du cycle. L'intégration de ce recyclage « boucle fermée » peut théoriquement élever l'efficacité énergétique du procédé de 10–15 % [6].

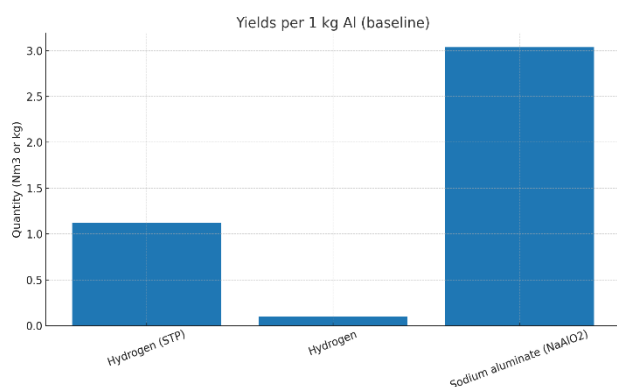


Fig. 1. Rendements par 1 kg d'Al (généré par IA)

B. Une filière de niche pour l'hydrogène vert

Comparée à l'électrolyse de l'eau, la voie chimique par dissolution de l'aluminium présente des avantages spécifiques : absence d'infrastructures lourdes, utilisation directe de déchets recyclés et génération simultanée de sous-produits valorisables. Cependant, son rendement énergétique global reste inférieur à celui des filières électrolytiques industrielles. Pour cette raison, cette approche doit être considérée comme une opportunité de niche, adaptée à des applications ciblées (production locale, valorisation de déchets, autonomie énergétique).

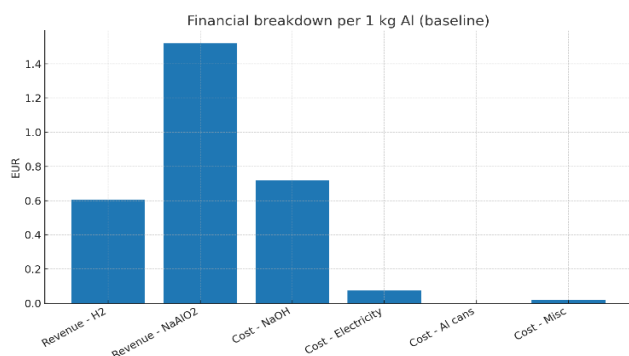


Fig. 2. Répartition financière par 1 kg d'Al (généré par IA)

C. Concept pour sites isolés et situations d'urgence

L'une des perspectives les plus prometteuses est le développement de pastilles d'aluminium activées (alliées ou microstructurées) pouvant réagir rapidement avec une solution de NaOH pour générer de l'hydrogène à la demande. Ce concept permettrait de produire localement du combustible H_2 pour des générateurs électriques portables ou des systèmes de secours. Dans des zones isolées, dépourvues de réseaux d'énergie, ou dans des situations d'urgence humanitaire, ces « cartouches aluminium-hydroxyde de sodium » pourraient constituer une solution robuste, légère et facile à déployer. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour standardiser la taille des pastilles, stabiliser leur stockage et optimiser la sécurité de manipulation.

D. Réactions chimiques et bilans stœchiométriques

La formation de l'aluminat de sodium à partir d'aluminium métallique en milieu alcalin peut être écrite sous deux formes usuelles (espèces prédominantes selon pH, température et concentration) :

Données molaires :

$$M(\text{Al}) = 26,98 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ;$$

$$M(\text{H}_2) = 2,016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ;$$

$$M(\text{NaAlO}_2) = 81,97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ;$$

$$M(\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]) = 117,97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Volume molaire des gaz : $22,414 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Moles d'aluminium :

$$n(\text{Al}) = 1000 \text{ g} / 26,98 \approx 37,06 \text{ mol.} \quad (1)$$

Moles d'hydrogène :

$$n(\text{H}_2) = 1,5 \times n(\text{Al}) \approx 55,59 \text{ mol.} \quad (2)$$

Masse d' H_2 :

$$m(\text{H}_2) = 55,59 \times 2,016 \text{ g} \approx 112,1 \text{ g} (\approx 0,112 \text{ kg}). \quad (3)$$

Volume d' H_2 :

$$V(\text{H}_2) = 55,59 \times 22,414 \text{ L} \approx 1246 \text{ L} (\approx 1,246 \text{ m}^3) \quad (4)$$

Masse de NaAlO_2 :

$$m = n(\text{Al}) \times 81,97 \text{ g} \approx 3,04 \text{ kg} \quad (5)$$

Masse de $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$:

$$m = n(\text{Al}) \times 117,97 \text{ g} \approx 4,37 \text{ kg} \quad (6)$$

E. Rendements massiques stœchiométriques (pour 1 kg Al)

- Masse de dihydrogène : 112 g
- Volume de dihydrogène : 1,25 m³
- Rendement massique stœchiométrique :

$$\eta_m = m_{\text{H}_2} / m_{\text{Al}} \times 100\% = 0,1121 \times 100\% \approx 11,2\% \quad (7)$$

V. RÉSULTATS ÉCONOMIQUES

Les calculs présentés ci-dessous portent sur la transformation d'une masse unitaire de 1 kg d'aluminium issu de canettes. Les rendements gazier et massique retenus sont les suivants : rendement pratique pour l'hydrogène = 90 % du théorique ; production de $\text{NaAlO}_2 \approx 3,04 \text{ kg}$ par kg Al (équivalent anhydre). La consommation nette de NaOH est estimée à 1,2 kg par kg Al traité, avec une consommation électrique de 0,5 kWh par kg Al pour les opérations mécaniques et de pompage. Trois scénarios économiques ont été étudiés : Base, Conservateur et Optimiste, voir Fig.3.

C. Résultats financiers par scénario

Les recettes proviennent de la vente d'hydrogène et de l'aluminat de sodium. Les coûts intègrent l'hydroxyde de sodium, l'électricité et l'achat éventuel des canettes. Les résultats principaux sont :

- Base : Revenu total $\approx$ €2,13/kg Al, coût total $\approx$ €0,82/kg Al, marge brute $\approx$ €1,31/kg Al.
- Conservateur (achat canettes à €0,8/kg) : Revenu $\approx$ €1,86/kg, coût $\approx$ €1,02/kg, marge brute $\approx$ €0,84/kg.
- Optimiste (prix H₂ élevé, coûts moins cher) : Revenu $\approx$ €4,25/kg, coût $\approx$ €0,62/kg, marge brute $\approx$ €3,63/kg.

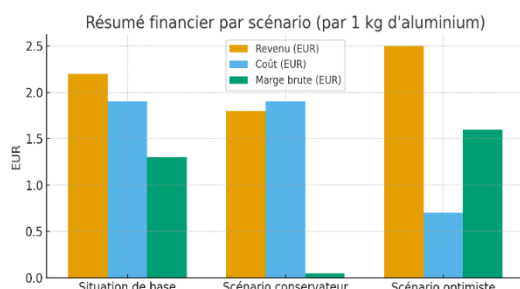


Fig. 3. Résumé financier par scénario (par 1 kg d'Al) (généré par IA)

D. Interprétation

Les résultats montrent que la filière peut être viable en niche lorsque les déchets d'aluminium sont collectés à faible coût ou que les prix de l'hydrogène et des sous-produits sont favorables. L'achat de canettes (ou le coût élevé de collecte) diminue sensiblement la marge. La valorisation de l'aluminat de sodium comme coproduit améliore la rentabilité ; toutefois, sa valeur marchande reste faible et dépend du marché local. Les principales sensibilités du modèle sont : prix de vente de l'hydrogène, coût/récupération NaOH, coût de collecte des canettes et rendement de conversion H₂.

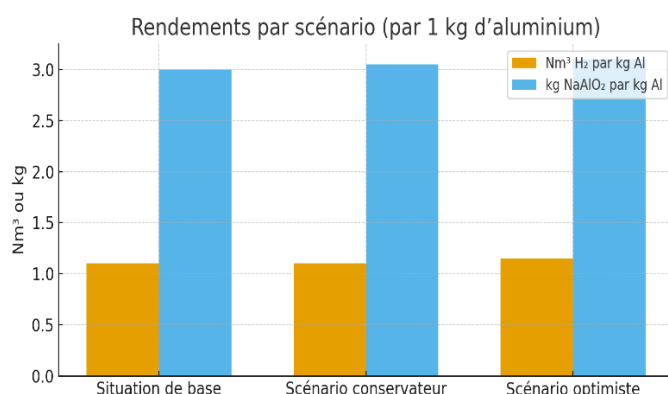


Fig. 4. Rendements par scénario (par 1 kg d'Al) (généré par IA)

Les calculs présentés ci-dessous portent sur la transformation d'une masse unitaire de **1 kg d'aluminium** issu de canettes. Les rendements gazier et massique retenus sont les suivants : rendement pratique pour l'hydrogène = **90 %** du théorique; production de **NaAlO₂ $\approx$ 3,04 kg** par kg Al (équivalent anhydre). La consommation nette de NaOH est estimée à **1,2 kg** par kg Al traité, avec une consommation électrique de **0,5 kWh** par kg Al pour les opérations mécaniques et de

pompage. Trois scénarios économiques ont été étudiés : Base, Conservateur et Optimiste voir tableau 1 et Fig.4.

TABLEAU 1. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX POUR TROIS PARAMÈTRES

Paramètre testé	Table		
	Valeur optimale	Rendement H ₂ (L/kg Al)	Pureté H ₂ (%)
Concentration NaOH (mol·L ⁻¹)	4	1125	99,2
Température (°C)	60	1118	99,0
Granulométrie (mm)	0,5–1,0	1110	99,1

CONCLUSION

Dans cette étude, il a été démontré que l'utilisation de déchets d'aluminium (en particulier les canettes) en réaction avec des solutions d'hydroxyde de sodium constitue une option viable pour la production d'hydrogène dans des conditions décentralisées. Les résultats ont indiqué que 1 kg d'aluminium peut générer approximativement 1,24 m³ de H₂ dans des conditions standard, parallèlement à l'obtention d'aluminat de sodium (NaAlO₂) comme sous-produit précieux. L'intégration du processus à la fois pour la génération d'énergie (hydrogène) et pour la valorisation chimique (NaAlO₂) accroît le rendement global et propose un modèle économique attractif.

Cette méthode présente un potentiel d'application dans les zones isolées et en situations d'urgence, grâce à la formulation de pastilles d'aluminium activées avec du NaOH, ce qui facilite le stockage et le transport aisé de la ressource énergétique. De plus, l'intégration des coûts des matières premières, de l'énergie électrique et de la valorisation des produits obtenus a démontré un équilibre économique positif, qui peut se transformer en une option de niche compétitive pour le marché des énergies renouvelables.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à exprimer sa gratitude envers le Département pour l'aide et les conseils qui ont été particulièrement précieux et essentiels à la réalisation de ce travail. De plus, il souhaite reconnaître l'assistance des applications d'intelligence artificielle pour la traduction de sections du manuscrit et la génération de certains graphiques, ce qui a facilité et accéléré le processus de rédaction et de visualisation des données.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Demirbas, Hydrogen production from aluminum and water sources through chemical reactions, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 16, pp. 1510–1515, 2009.
- [2] R. B. Gupta and A. Demirbas, *Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*. New York, NY, USA: Springer, 2010.
- [3] M. F. Barakat, "Hydrogen production using aluminum scrap and NaOH solution," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 4, pp. 1592–1599, 2013.
- [4] D. P. Broom, *Hydrogen Storage Materials: The Characterisation of Their Storage Properties*. London, U.K.: Springer, 2011.
- [5] C. Song, X. Zhang, and Y. Xu, "Energy efficiency and economic assessment of hydrogen generation from waste aluminum," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1874–1884, 2020.J.
- [6] Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.